

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**Інженерно-хімічний факультет**

**Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

«На правах рукопису»

УДК 66.063.62

До захисту допущено

Завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф.

\_\_\_\_\_ Я.М. Корнієнко

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 201\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності 8.05050303 Обладнання лісового комплексу

на тему: **Процес перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті**

Виконав: студент VI курсу, групи ЛБ-51мв

Колобашкін Леон Віталійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Науковий керівник: кандидат технічних наук,

доцент Семінський Олександр Олегович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних

ситуаціях: канд. техн. наук, доцент Ковтун Іван Миколайович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Консультант з розроблення стартап-проекту:

к.т.н., старший викладач Новохат Олег Анатолійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент

\_\_\_\_\_  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище і ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Рецензент

\_\_\_\_\_  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище і ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає  
запозичень праць інших авторів без відповідних  
посилань

Студент \_\_\_\_\_ Л. В. Колобашкін

Київ 2018

**Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”**

Інженерно-хімічний факультет

Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр

Напрямок підготовки: 6.050503 Машинобудування

Спеціальність: 8.05050303 – Обладнання лісового комплексу

Спеціалізація: Комп’ютерне проектування та програмне управління  
обладнанням целюлозно-паперового виробництва

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, д-р техн. наук, проф.

\_\_\_\_\_ Я.М. Корнієнко

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію**

студенту Колобашкіну Леону Віталійовичу

**1. Тема дисертації:** Процес перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті.

Науковий керівник Семінський Олександр Олегович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв затверджена наказом по університету від « 20 » квітня 2018 р. №1194-с.

**2. Термін здачі студентом оформленої дисертації:** 14 квітня 2018 р.

**3. Об’єкт дослідження:** перетворення енергії потоку рідини в роторно-пульсаційному апараті.

**4. Предмет дослідження:** гідравлічні та енергетичні характеристики роторно-

пульсаційного апарату з циліндричними робочими органами.

#### **5. Перелік питань, які необхідно розкрити:**

1. Сформулювати фізичну модель процесів, що протікають в роторно-пульсаційному апараті;
2. Розробити математичний опис процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті;
3. Створити лабораторну установку для проведення експериментальних досліджень гідродинаміки роторно-пульсаційного апарату;
4. Розробити методики експериментальних досліджень та аналізу дослідних даних;
5. Перевірити адекватність математичного опису дослідним даним;
6. Виконати експериментальну перевірку положень фізичної та математичної моделі;
7. Провести узагальнення експериментальних даних;
8. Розробити алгоритм розрахунку промислового апарату та обґрунтувати його конструкцію.

#### **6. Перелік ілюстрованого матеріалу представлено:**

- 1) у вигляді презентації: актуальність, мета, об'єкт дослідження, предмет, задачі дослідження, наукова новизна магістерської дисертації, фізична модель процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті, математична модель гідродинаміки роторно-пульсаційного, експериментальна установка, графіки експериментальних функціональних залежностей, верифікація математичної моделі, технічна ідея промислового апарату, алгоритм розрахунку промислового апарату, висновки, публікації за матеріалами дисертаційної роботи
- 2) у вигляді плакату: Роторно-пульсаційний апарат (складальне креслення на форматі A1).

**7. Перелік публікацій** заплановано 2 статті у фахових виданнях, 1 патент на корисну модель, участь у 5 конференціях з опублікуванням 5 тез-доповідей до

міжнародних науково-практичних конференцій студентів, аспірантів і молодих вчених.

#### **8. Консультант з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях**

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях	канд. техн. наук, доцент Ковтун І.М.		
Розроблення стартап-проекту	канд. техн. наук, ст. викладач Новохат О.А.		

**9. Дата видачі завдання:** 01 вересня 2015 р.

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_ О.О. Семінський

**Завдання прийняв до виконання** \_\_\_\_\_ Л. В. Колобашкін

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів дисертації	Примітка
1	2	3	4
1	Аналіз літературних і патентних джерел по дослідженню процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті. Формулювання задач теоретичних та експериментальних досліджень.	01.09.2015 – 27.12.2015	
2	Розробка фізичної та математичної моделі процесу течії. Вибір та обґрунтування методів розв'язання математичної моделі.	05.01.2016 – 30.05.2016	
3	Розробка лабораторної установки та розробка методики експериментальних досліджень гідродинамічних характеристик роторно-пульсаційного апарату.	13.09.2016 – 30.01.2017	
4	Проведення експериментальних досліджень	01.02.2016 – 02.03.2017	
5	Обробка та узагальнення результатів дослідження.	02.03.2017 – 14.03.2017	
6	Аналіз результатів експериментальних досліджень та підготовка матеріалів до публікації тез доповідей та участі у конференції.	16.03.2017 – 25.03.2017	
7	Розробка алгоритму розрахунку роторно-пульсаційного апарату.	26.03.2017 – 15.04.2017	
8	Висновки і рекомендації щодо конструювання апарату.	15.04.2017- 25.04.2017	
9	Попередній захист	26.04.2017 – 26.04.2017	
10	Оформлення атестаційної роботи магістра та її підготовка до захисту.	27.04.2017 – 25.05.2017	

**Студент**

\_\_\_\_\_

Л.В. Колобашкін

(підпис)

**Науковий керівник дисертації**

\_\_\_\_\_

О.О. Семінський

(підпис)

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему: «Процес перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті» / КПП ім. Ігоря Сікорського; Керівник О.О. Семінський – К., 2018. – 162с.: 50 іл. – Виконавець Л.В. Колобашкін. – Бібліогр.: 110 п.

Об'єкт дослідження – є процес перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті.

Предмет дослідження – гідравлічні та енергетичні характеристики роторно-пульсаційного апарату.

Мета проекту – встановлення закономірностей, процесу перенесення енергії в роторно-пульсаційному апараті та визначення раціональних параметрів конструкції та режимів роботи РПА.

Методи дослідження: фізико-математичне моделювання процесу перетворення енергії в роторно-пульсаційному апараті числовими методами із застосування інтеграційних процесів і прикладних пакетів ЕОМ, визначення достовірності та адекватності отриманих результатів моделювання та їх статичний аналіз.

Результати роботи та їхня новизна: запропоновано фізичну та математичну моделі процесу перетворення енергії у потоках рідини в РПА з набірними робочими органами. Одержані залежності для визначення витрат енергії пульсаційного вузла в залежності від технологічних та конструкційних параметрів РПА. Перевірено адекватність математичної моделі.

За результатами роботи опубліковано дві статті у фахових виданнях, п'ять тез доповідей на конференціях, опубліковано один патент України на корисну модель.

**РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНИЙ АПАРАТ, ДИСПЕРГУВАННЯ, ГОМОГЕНІЗАЦІЯ, ПРОЦЕС ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ У ПОТОКАХ РІДИНИ В РПА.**

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на тему: «Процесс преобразования энергии в потоках жидкости в роторно-пульсационном аппарате» / КПИ им. Игоря Сикорского; Руководитель О.О. Семинский - К., 2018. - 162с .: 50 ил.- Исполнитель Л.В. Колобашкин. – Библиогр. : 110 с.

Объект исследования - процесс преобразования энергии в потоках жидкости в роторно-пульсационном аппарате.

Предмет исследования - гидравлические и энергетические характеристики роторно-пульсационного аппарата.

Цель проекта - установление закономерностей, процесса переноса энергии в роторно-пульсационном аппарате и определение рациональных параметров конструкции и режимов работы РПА.

Методы исследования: физико-математическое моделирование процесса преобразования энергии в роторно-пульсационном аппарате численными методами с применением интеграционных процессов и прикладных пакетов ПК, определение достоверности и адекватности полученных результатов моделирования и их статистический анализ.

Результаты работы и их новизна: предложено физическую и математическую модели процесса преобразования энергии в потоках жидкости в РПА с наборными рабочими органами. Получены зависимости для определения затрат энергии пульсационного узла в зависимости от технологических и конструктивных параметров РПА. Проверено адекватность математической модели.

По результатам работы опубликовано две статьи в профессиональных изданиях, пять тезисов докладов на конференциях, опубликовано один патент Украины на полезную модель.

РОТОРНО-ПУЛЬСАЦИОННЫЙ АППАРАТ, ДИСПЕРГИРОВАНИЯ, ГОМОГЕНИЗАЦИИ, ПРОЦЕСС ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ В РПА.

## ABSTRACT

Master's thesis: « Process of energy transform in fluid flows in rotary pulse apparatus » / Igor Sikorsky KPI; Research Advisor O. Seminskyi - K., 2018. - 162 pp. : 50 pic. - Artist L. Kolobashkin. - Ref.: 110 p.

Object of study - is process of energy transform in fluid flows in rotary pulse apparatus.

Subject of research - hydraulic and power characteristics of the rotary-pulsating apparatus.

The purpose of the project is to establish the regularities, the process of energy transform in fluid flows in rotary pulse apparatus, and to determine the rational parameters of the design and operating conditions of the RPA.

Methods of research: physical and mathematical modeling of the process of energy transform in fluid flows in rotary pulse apparatus by numerical methods for the application of integration processes and application packages of computers, determination of reliability and adequacy of the obtained modeling results and their static analysis.

The results of work and their novelty: the physical and mathematical models of the process of energy transform in fluid flows in RPA with the set working bodies are proposed. Dependences are obtained for determining the energy consumption of the pulsating unit, depending on the technological and structural parameters of the RPA. The adequacy of the mathematical model is checked.

Based on the results of the work, two articles were published in professional journals, five theses of repo at conferences, one patent of Ukraine was published on a useful model.

ROTOR-PULSATING APPARATUS, DISPERSION, HOMOGENIZATION, ENERGY TRANSFORM PROCESS IN FLUID FLOWS IN RPA.



## ЗМІСТ

Перелік умовних позначень .....	11
Вступ.....	12
1 СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	17
1.1 Стан розвитку та використання роторно-пульсаційних апаратів	17
1.2 Аналіз існуючих конструкцій роторно-пульсаційних апаратів ...	19
1.3 Аналіз моделей гідродинамічних характеристик роторно-пульсаційного апарату .....	29
1.4 Принцип використання роторно-пульсаційних апаратів в технологічних лініях.....	32
1.5 Висновки до розділу .....	36
1.6 Мета та задачі дослідження .....	37
2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ У ПОТОПКАХ РІДИНИ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ ...	38
2.1 Фізична модель процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті .....	38
2.2 Математична модель процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті.....	41
2.3 Висновки до розділу .....	45
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ У ПОТОКАХ РІДИНИ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ .....	47
3.1 Опис експериментальної установки .....	47
3.2 Методика проведення експериментальних досліджень .....	49
3.3 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях .....	53
3.3.1 Повітря робочої зони.....	54
3.3.2 Виробничий шум .....	55
3.3.3 Вібрація.....	56
3.3.4 Освітлення робочої зони .....	58

3.3.5	Небезпека дії рухомих та обертових частин .....	59
3.3.6	Електробезпека.....	59
3.3.7	Пожежна безпека .....	61
3.4	Результати та аналіз експериментальних досліджень .....	62
3.5	Перевірка адекватності математичної моделі дослідним даним .....	68
3.6	Висновки до розділу .....	70
4	ОБҐРУНТУВАННЯ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	71
4.1	Опис технологічної схеми отримання паперової маси.....	71
4.2	Методика розрахунку роторно-пульсаційного апарату.....	73
4.3	Рекомендації щодо впровадження .....	75
4.4	Висновки до розділу .....	76
5	РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ .....	77
5.1	Опис ідеї проекту .....	77
5.2	Технологічний аудит ідеї проекту .....	78
5.3	Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	80
5.4	Розроблення ринкової стратегії ринку .....	97
5.5	Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	100
5.6	Висновки до розділу .....	102
	Висновки .....	103
	Выводы .....	107
	Conclusions .....	109
	Перелік посилань.....	111
	Додаток А регламент пошуку .....	115
	Додаток Б аналіз похибок вимірювань .....	122
	Додаток В публікації.....	125
	Додаток Г специфікація до складального креслення .....	160

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Умовні позначення:

$\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини, Па·с;

$n$  – частота обертання ротора, с<sup>-1</sup>;

$D$  – середній діаметр кільцевого зазору, м;

$h$  – висота зазору, м;

$a$  – ширина прорізей каналів у напірному модулі, м;

$\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$Q_V$  – об'ємна продуктивність апарату, м<sup>3</sup>/с;

$\delta$  – ширина зазору, м;

$\omega$  – кутова швидкість обертання, 1/с;

$r$  – поточний радіус обертання, м;

$z$  – кількість прорізей, шт;

$t$  – крок між прорізами, м;

$P_0$  – тиск в бульбашці в початковий момент стискання, Па;

$v$  – швидкість мікроструменя рідини, м/с;

$k$  – об'ємний модуль пружності, Па;

$\tau$  – дотичне напруження в зазорі, Па;

$\dot{\gamma}$  – градієнт швидкості в зазорі, с<sup>-1</sup>;

$f$  – коефіцієнт гідравлічного тертя;

$V$  – об'єм рідини в РПА, м<sup>3</sup>;

Скорочення:

РПА – роторно-пульсаційний апарат;

## **Вступ**

### **Актуальність теми**

Роторно-пульсаційні апарати (РПА) – високоефективні компактні універсальні апарати, що виконують одночасно функції диспергатора, гомогенізатора, насоса і призначені для приготування гомогенізованих суспензій, емульсій (у тому числі із високим вмістом дисперсної складової), та інших складних рідинних систем із компонентів, що важко змішуються, а також інтенсифікації теплообмінних процесів. РПА використовуються в різних галузях промисловості наприклад целюлозно-паперова, харчова, косметична, сільське господарство, виробництво будівельних матеріалів, нафтопереробній, хімічна.[1]

Описаними прикладами не обмежується промислове застосування роторно-пульсаційних апаратів. Їх безсумнівні переваги зумовлюють постійне вдосконалення конструкцій та знаходження нових шляхів використання РПА для інтенсифікації гідромеханічних та тепломасообмінних процесів, що відкриває подальші перспективи для впровадження цього типу апаратів як складових інноваційних технологій і прогресивних виробництв.[1]

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Магістерська дисертація виконується згідно з тематичним планом кафедри МАХНВ КПІ ім. Ігоря Сікорського та відповідно до напрямку підготовки фахівців освітньо-кваліфікаційного рівня «магістр», за спеціальністю 8.090219 «Обладнання лісового комплексу», спеціалізації «Комп'ютерне проектування, управління обладнання целюлозно-паперового виробництва», планом НДР кафедри.

### **Об'єкт дослідження**

Процес перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті.

## **Предмет дослідження**

Гідравлічні та енергетичні характеристики одноступінчастого роторно-пульсаційного апарату з циліндричними робочими органами.

## **Методи дослідження**

Теоретичний аналіз процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті, математичне моделювання цього процесу на основі аналітичного розв'язання рівнянь, експериментальні дослідження процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті, визначення достовірності та отриманих результатів моделювання.

## **Мета дослідження**

Встановлення закономірностей, процесу перетворення енергії у потоках рідини в одноступінчастому роторно-пульсаційному апараті та вдосконалення конструкції РПА.

## **Завдання дослідження**

1. Сформулювати фізичну модель руху потоків у пульсаційній ступені роторно-пульсаційного апарата.
2. Розробити математичний опис процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті.
3. Створити лабораторну установку для проведення експериментальних досліджень гідродинаміки роторно-пульсаційного апарату.
4. Скласти методики експериментальних досліджень та аналізу дослідних даних.
5. Перевірити адекватність математичного опису дослідним даним.
6. Встановити функціональні залежності напору в апараті від витрати оброблюваної рідини і частоти пульсацій та потужності двигуна від витрати оброблюваної рідини і числа обертів приводного валу.

7. Вдосконалити конструкцію роторно-пульсаційного апарату та запропонувати варіант його промислового використання.
8. Скласти методику розрахунку роторно-пульсаційного апарату.

### **Наукова новизна одержаних результатів**

1. Запропоновано фізичну та математичну моделі процесу перетворення енергії у потоках рідини для ступені роторно-пульсаційного апарата.
2. Уперше встановлені залежності, що описують гідродинамічні та енергетичні параметри роботи пульсаційної ступені роторно-пульсаційного апарата в умовах регулювання режиму зміною частоти обертання ротора.
3. Уперше одержано залежність гідравлічного к.к.д. від частоти обертання ротора РПА та на її основі проаналізовано гідродинамічну ефективність роботи апарата.

### **Практичне значення одержаних результатів**

1. Розроблено вдосконалену конструкцію РПА та обґрунтовано економічну доцільність її промислового впровадження.
2. Запропоновано технічне рішення з використання РПА у виробничому циклі підготовки паперової маси перед її напуском на сіткову частину папероробної машини.
3. Складено алгоритм розрахунку роторно-пульсаційного апарата.

Запропонованим у дисертації технічним рішенням є нова конструкція роторно-пульсаційного апарата, на яку отримано патент на корисну модель № 114656 від Державного департаменту інтелектуальної власності, що був опублікований 10.03.17.

### **Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів:**

- положення та висновки дисертаційної роботи базуються на фундаментальних фізичних законах покладених в основу фізичної та математичної моделей, достовірність яких перевірено експериментально;
- проведено розрахунок похибок вимірювання фізичних величин, для вимірювання використовувалась сучасна обчислювальна техніки та програмне забезпечення.

### **Особистий внесок здобувача**

Особистий внесок здобувача полягає у визначенні завдань дослідження та проведенні експериментальних робіт, аналізі, систематизації та математичній обробці дослідних даних, підготовці публікації; розробці технічної документації та обґрунтування доцільності промислового впровадження розробленої конструкції апарата.

### **Апробація результатів дисертації**

Основні положення дисертаційної роботи доповідалися на наступних конференціях:

- IX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (м. Київ, 2015 р.);
- X міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (м. Київ, 2016 р.);
- XI міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (м. Київ, 2016 р.);

– XII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (м. Київ, 2017 р.);

– XXII міжнародної науково-практичної конференції "Гідроаеромеханіка в інженерній практиці" (м. Черкаси – Київ, 2017 р.);

### **Публікації**

Основний зміст дисертаційної роботи викладено у 8-ми опублікованих роботах, у тому числі: двох статтях у наукових фахових виданнях України, п'яти тезах доповідей на міжнародних конференціях, одному патенті України на корисну модель.

### **Структура й обсяг роботи.**

Дисертація складається з п'яти розділів, загальних висновків, переліку посилань, та додатків. Повний обсяг дисертації становить 163 сторінки, 50 рисунків, 21 таблиці і списку літературних джерел з 27 найменувань (на 4 сторінках), перелік умовних позначень на 1 сторінці, додатки складають 49 сторінок.



## **1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ**

### **1.1 Стан розвитку та використання роторно-пульсаційних апаратів**

Роторно-пульсаційні апарати (РПА) – високоефективні компактні універсальні апарати, що виконують одночасно функції диспергатора, гомогенізатора, насоса і призначені для приготування гомогенізованих суспензій та емульсій, та інших складних рідинних систем із компонентів, що важко змішуються, а також інтенсифікації теплообмінних процесів [1].

Огляд літератури засвідчує що найбільш перспективним є використання роторно-пульсаційних апаратів в таких галузях промисловості:

1. Целюлозно-паперова – для вирівнювання помелу волокон у паперовій масі, приготування композицій волокнистих суспензій і диспергування волокнистої суспензії при різних концентраціях маси.[1]

2. Харчова: у виробництвах молока і молокопродуктів – для гомогенізації незбираного молока, відновлення сухого молока, приготування йогуртів, плавлених і м'яких сирів; у хлібопекарському виробництві – для приготування тіста із зерна і круп; у спиртовому виробництві – для мокрого помелу зерна; а також для приготування соків, квасу, майонезу, гірчиці, рибних, фруктових та овочевих паст і пюре, переробка ягід і фруктів – на джеми і повидла, овочів і грибів – на ікру.[1]

3. Косметична, парфумерна та фармакологічна – для приготування кремів, вазеліну, мазей, шампунів, бальзамів лосьйонів, гелів, лікарських препаратів у формі розчину .[1]

4. Сільське господарство: приготування заміниці незбираного молока для відкорму молодняка, як з сухого молока, так і зі свіжої рослинної сировини (ріпаку, люпину, сої); переробка грубих харчових відходів при виробництві кормів для тварин, птиці та риби; підвищення ефективності мінеральних і органічних добрив (гною тварин і пташиного посліду).[1]

5. Виробництво будівельних та оздоблювальних матеріалів: приготування рідкої фази клею з сухих компонентів; приготування пластифікаторів, мастик, пігментів, водоемульсійних фарб; приготування активованих водоцементних суспензій при виробництві бетону і пінобетону різних модифікацій і призначень.[1]

6. Нафтопереробній: приготування котельного та пічного палив з відходів нафтопродуктів і відпрацьованого масла; приготування, літолу, масел і мастил; приготування водопаливних емульсій («мазут-вода», «дизельне паливо-вода»), біопаливних емульсій («торф-вода-мазут», дизпаливо); переробки відстою бензо- і нафтоцистерн; виробництва різних модифікацій бітуму.[1]

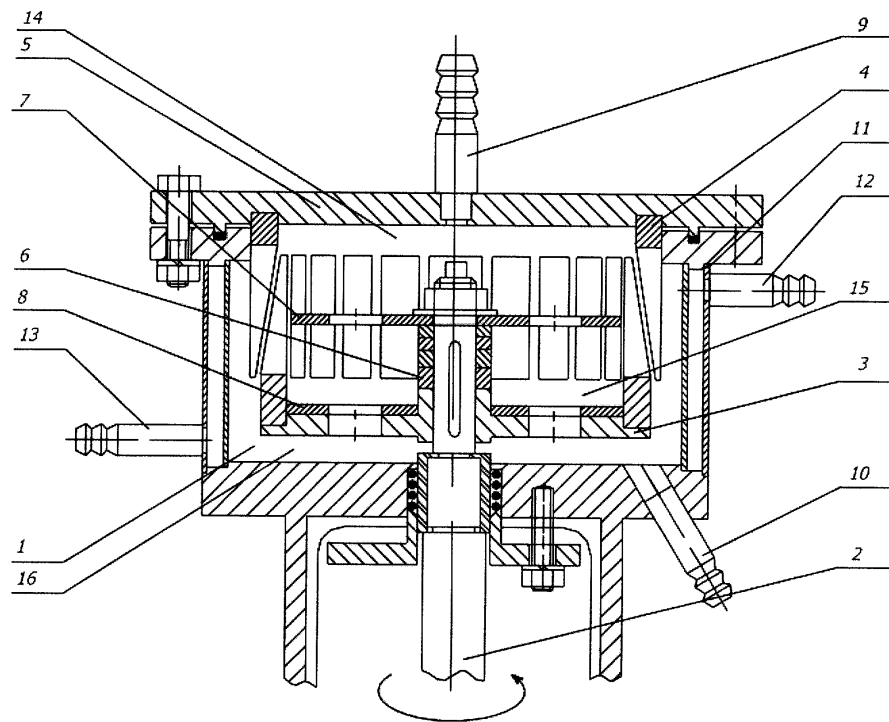
7. Хімічна промисловість – для виробництва лакофарбових виробів, кислот, миючих засобів, хімікатів, барвників, чорнил, різних видів технічних розчинів, а також для утилізації відходів хімічних і нафтопереробних виробництв.[1]

Використання РПА дозволяє досягти суттєвого скорочення часу виробництва рідинних систем (наприклад, при виготовленні клеїв досягається скорочення циклу приготування до 30 разів); в харчовій та молочній промисловості використання РПА при гомогенізації дозволяє досягати рівномірного розподілу жиру, збільшити однорідність продукту, також продукт набуває стійкості до відстоювання вершків і розвитку процесів окислення, збільшується термін зберігання; у спиртовій промисловості підвищує спиртову концентрацію в готовій продукції; у косметичній покращується якість продукту і скорочення циклу виготовлення продукції, підвищення якості; при виготовленні нафтопродуктів значно зменшує енергозатрати на виробництво і прискорює час процесу виготовлення. Описаними прикладами застосування РПА не обмежується, постійно конструкції вдосконалюються та знаходять нові напрямки застосування в легкій промисловості, важкій промисловості і в інших галузях машинобудування. [1]

## 1.2 Аналіз існуючих конструкцій роторно-пульсаційних апаратів

Роторно-пульсаційні апарати використовують в різноманітних технологічних процесах, що потребують інтенсивного і ефективного змішування гомогенних та гетерогенних середовищ з високою в'язкістю. Робочі органи таких апаратів виготовляють переважно у вигляді набору циліндрів, конусів або дисків з прорізами різної форми. При обертанні одного набору циліндрів відносно іншого набору циліндрів відбувається швидке чергування суміщення та несуміщення прорізів, що призводить до синхронної зміни швидкості руху оброблюваного середовища через прорізи, тобто виникає пульсуючий з великою частотою потік. В щілинах між рухомими і нерухомими робочими органами на оброблюване середовище діє комплекс сил зрізу, тертя, розриву, пульсацій тиску та швидкості, а в окремих випадках - гідравлічних ударів та явищ кавітації, що дозволяє досягти інтенсивної обробки у відносно малому об'ємі. Апарати призначені для проведення у полі пружних коливань неперервних процесів змішування, екстракції, диспергування, емульгування, гомогенізації, хімічної взаємодії реагентів тощо, які протікають в системах "рідина - рідина" та "рідина - тверде тіло", і може бути використаним в харчовій, хімічній, нафтохімічній, лакофарбовій та інших галузях промисловості.[2]

Особливостями конструкції апарату рисунок 1.1 [3] є те, що апарат містить корпус з встановленими в ньому ротором і статором з робочими елементами у вигляді зубів. Корпус апарату розділений на дві секції перегородками, в яких є отвори різного діаметру. Одна з перегородок насаджується на вал до основи ротора і кріпиться до нього шпонкой, а друга розташована в середній частині корпусу, причому нижньою стороною спирається на втулку, надітою на вал, а верхньою стороною закріплена гайкою.



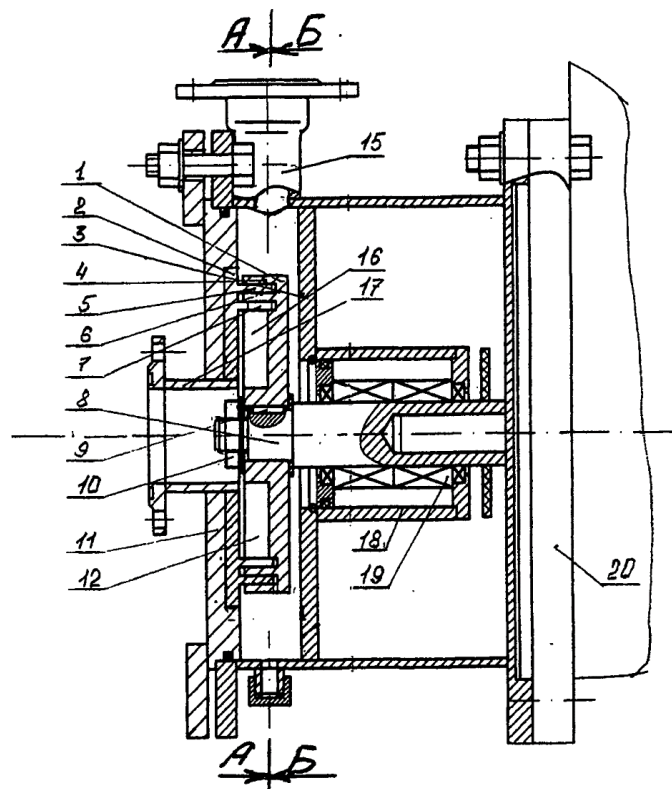
1 – корпусу; 2 – валу; 3 – ротор; 4 – статор; 5 – кришка; 6 – регулювальні шайби; 7,8 – перегородки, 9, 10 – патрубки для введення та виведення компонентів; 11 – сорочка; 12, 13 – вхідний та вихідний патрубок холодоносія; 14 – робоча порожнина; 15 – нижня частина робочої області; 16 – зовнішня порожнина апарату.

Рисунок 1.1 – Багатосекційний роторно-пульсаційний апарат

Технічним результатом в даній конструкції багатосекційного роторно-пульсаційного апарату є те, що за рахунок встановлених в корпусі розділових перегородок з різним діаметром отворів збільшується час перебування частинок в апараті, що дозволяє інтенсифікувати протікання технологічних процесів і підвищити якість одержуваної суміші, дозволяє підвищити ефективність процесів в апараті.

Недоліками даної конструкції апарату є складність у виготовленні робочих органів, оскільки різні діаметри робочих отворів. Також розділові перегородки здійснюють додатковий гідравлічний опір та збільшують витрати енергії на проведення процесів в апараті.

Особливостями конструкції апарату рисунок 1.2 [4] є те, що на робочих поверхнях ротора і статора виконані концентрично розташовані по колу ряди шипів відповідно, що чергуються відповідно з пазами, причому ротор встановлений на вал приводу з можливістю реверсивного обертання. На робочій поверхні ротора встановлені входні лопатки, при цьому шипи останнього ряду є вихідними лопатками і мають різну форму по довжині і по поперечному перерізі в різних варіантах виконання. Лопатки для можливості реверсивного обертання ротора мають однакові по обидва боки кути атаки « $\alpha$ » і кути виходу « $\beta$ ». Осі симетрії входних лопаток, додаткових входних лопаток і вихідних лопаток розташовані радіально, а поздовжня вісь напірного патрубку і центральні осі ротора і статора розташовані на одній прямій.



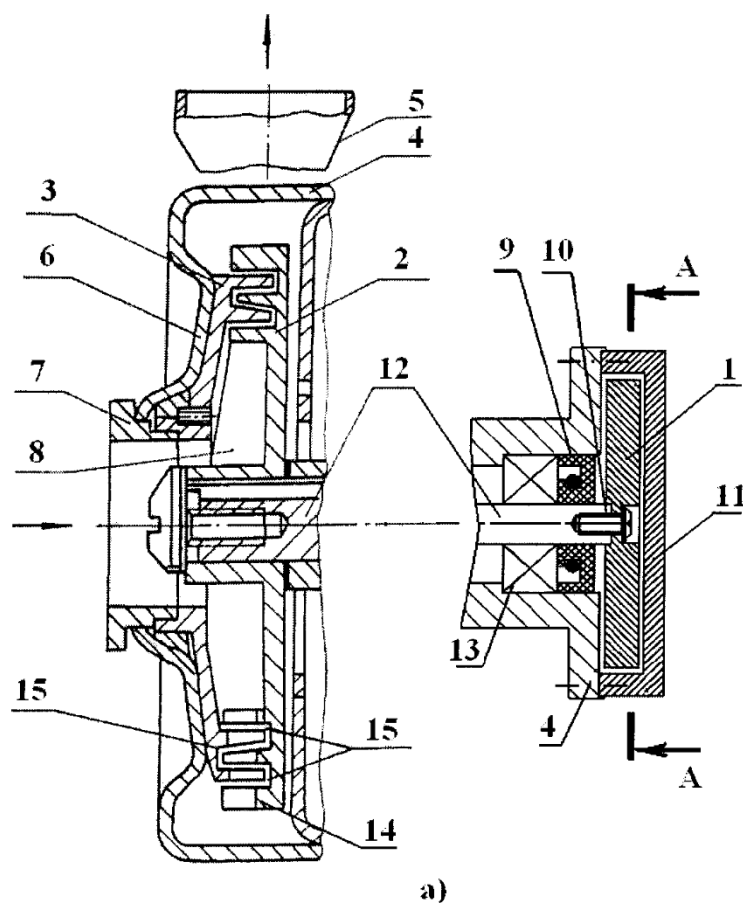
- 1 – ротор; 2 – статор; 3 – корпус; 4, 5 – ряди шипів; 6, 7 – пази; 8 – привідний вал; 9,10 – фіксуєчі пристрої; 11 – кришка; 12 – входні лопатки; 13 – додаткові входні лопатки; 14 – вихідні лопатки; 15 – напірний патрубок; 16 – камера попереднього змішування; 17 – впускний патрубок; 18 – корпус підшипника; 19 – підшипниковий вузол; 20 – фіксуєча плита.

Рисунок 1.2 – Роторно-пульсаційний апарат

Технічним результатом винаходу є збільшення терміну служби апарату. При обертанні ротора 1 в одному напрямку, наприклад за годинниковою стрілкою, у ротора 1 зношуються ліві кромки вхідних лопаток 12, додаткових вхідних лопаток 13, шипів 4 і вихідних лопаток 14, також у статора 2 зношуються ліві кромки шипів 5. При їх знос апарат перемикають на реверсивне обертання, тобто на обертання проти годинникової стрілки, та на роботу у ротора 1 правих крайок вхідних лопаток 12, додаткових вхідних лопаток 13, шипів 4 і вихідних лопаток 14, і у статора 2 на роботу правих крайок шипів 5.

Недолікам конструкції є встановлений у верхній частині апарату вихідний патрубок, що заходиться в радіальному напрямі дії відцентрової сили. Таке розташування патрубку потребує створення додаткового напору апаратом для прокачування оброблюваного середовища вище рівня вхідного патрубку, або встановлення додаткового допоміжного обладнання насосу, що також збільшує питомі витрати енергії.

Особливостями конструкції апарату рисунок 1.3 [5] є те, що встановлені в корпусі ротор і статор, на своїх робочих поверхнях мають виконані зубчасті елементи, що представляють собою концентрично розташовані по колу ряди, що складаються з виступів і западин, вхідні лопатки насоса, вихідні лопатки насоса і кільцеві канавки, виконані між рядами зубчастих елементів ротора і статора, в яких розміщені виступи зубчастих елементів статора і ротора. На вал ротора жорстко посаджена лопатева крилатка, на кришці встановлені вхідний і вихідний патрубки, поздовжні осі яких розташовані в площині, що проходить через торець лопатевої крильчатки в середній її частині. вхідний патрубок з'єднаний з насосом, а вихідний патрубок з впускним патрубком апарату.



1 – лопатева крилатка; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – корпус; 5 – випускний патрубок; 6 – кришка; 7 – впускний патрубок; 8 – вхідні лопатки; 9 – сальник, 10 – гвинт; 11 – кришка лопатевої крилатки; 12 – вал ротора; 13 – підшипник; 14 – вихідні лопатки насоса; 15 – зубчасті елементи статора і ротора; 16 – вхідний патрубок; 17 – вихідний патрубок.

Рисунок 1.3 – Роторно-пульсаційний апарат

Технічний результат полягає в підвищенні ефективності роботи апарату, це здійснюється за рахунок енергії струменя рідини, коли струмінь під тиском подається зовнішнім насосом у виконаний зовні корпусу вхідний патрубок і вдаряє в лопаті крильчатки, приводячи відповідно жорстко посаджену лопатева крилатку на роторі в обертання і далі рідина під тиском витікає через вихідний патрубок і подається у впускний патрубок апарату для подальшої обробки. Використання приводу від струменя рідини забезпечує найбільш ефективну і економічну роботу РПА. Апарат також є промислово

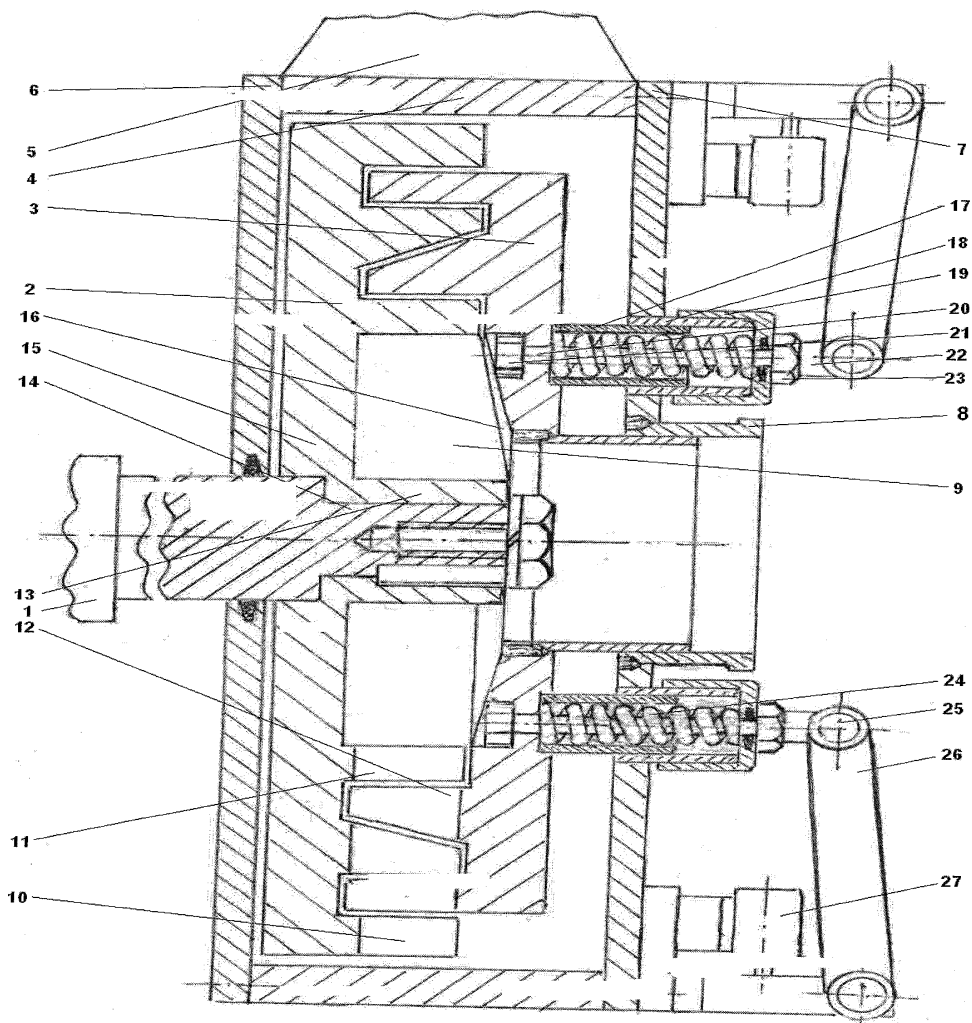
придатним, так як для його реалізації можуть бути використані не дорогі, легко виготовляються деталі.

Недоліками конструкції є встановлений на вхідному патрубку насос для прокачування оброблюваного середовища та створення початкового напору, що збільшує витрати енергії апарату. Також використання допоміжного обладнання ускладнює довшострокову експлуатацію оскільки різне обладнання має різний термін роботи до проведення ремонтних робіт.

Особливостями конструкції апарату рисунок 1.4 [6] є те, що статор має пристрій для регулювання зазору між зубчастими елементами ротора і статора, а електричний виконавчий механізм приводу пристрою працює по сигналу датчика тиску в робочій камері. При цьому на диску статора є закріплені два або більше спеціальних стаканів для установки в них тарованих пружин, які змонтовані на штоках і знаходяться в вільному стані. Шток має вушко, яке з'єднується з кулісою, а другим кінцем куліса закріплена на валу електричного виконавчого механізму. За сигналом датчика тиску, встановленого в робочій камері, при заданих програмою в мікропроцесорі режимах роботи включається електричний виконавчий механізм, вал якого, повертаючи кулісу, тягне за собою шток, стискає пружину в склянці і переміщує диск статора, забезпечуючи тим самим певний зазор між зубами статора і ротора, створюючи оптимальні режими подрібнення необхідного продукту, що і підтримується заданим програмою тиск в робочій камері. Крім того, можливе екстрене регулювання зазору між зубами ротора і статора в міру їх зносу.

Технічний результат полягає в підвищенні зручності при експлуатації та обслуговуванні, зниженні енергоємності процесу при одночасному регулюванні модуля помелу і поліпшенні режиму кавітації для отримання заданого високоякісного продукту.





1 – привід; 2 – ротор; 3 – статор; 4 – корпус; 5 – впускний патрубок;  
 6, 7 – задня та передня кришки; 8 – впускний патрубок; 9 – вхідні лопатки;  
 10 – вихідні лопатки; 11, 12 – зубчасті елементи ротора і статора;  
 13 – маточина; 14 – вал; 15 – диск; 16 – робоча камера; 17, 18 – стакани;  
 19 – кришка; 20 – штоки; 21 – циліндрична головка; 22 – проушина;  
 23 – контргайка; 24 – таровані пружини; 25 – стопорний палець; 26 – куліса;  
 27 – електричні виконавчі механізми.

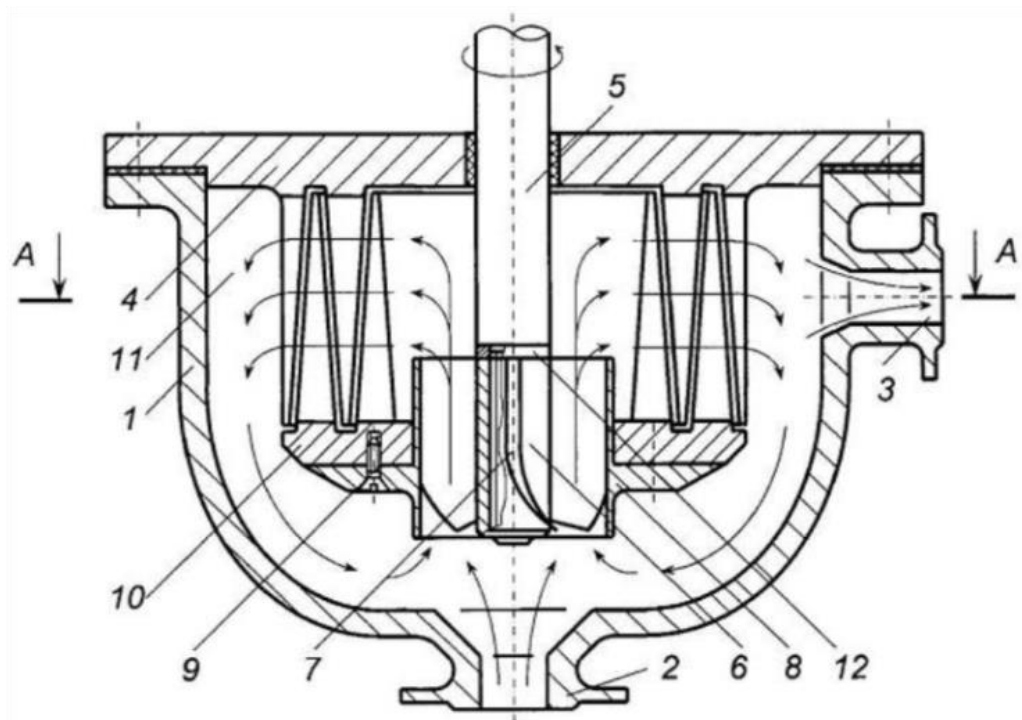
Рисунок 1.4 – Роторно-пульсаційний апарат

Недоліками конструкції є загальні габарити установки разом з регулювальними механізмами, також складність регулювання робочих зазорів з високою точністю, необхідність додаткових робіт для обслуговування регулювальних механізмів апарату.

Особливостями конструкції апарату рисунок 1.5 [7] є те, що згори закритий кришкою, що конструктивно виконана як єдине ціле із статором. На валу, що обертається електродвигуном, при допомозі різьби, напрямом якої для створення ефекту самозакручування співпадає з напрямком обертання валу, закріплено втулку, до якої приварені від 4 до 6 вигнутих у осьовому напрямку лопатей крилатки. Лопаті вигнуто у напрямку обертання валу, а їх зовнішні краї приварені до внутрішньої поверхні напрямної труби, до фланця якої при допомозі 3-8 гвинтів прикріплено ротор. Робоча пара статор-ротор є набором коаксіальних тіл обертання, що взаємно чергуються, з прорізами прямокутної або іншої довільної форми. Зовнішня поверхня пари статор-ротор утворює з корпусом апарата кільцевий простір, що сполучається із лопатевою крилаткою та вхідним патрубком. Передбачена можливість регулювання радіального проміжку між нерухомими робочими елементами (тілами обертання) статора і рухомими робочими елементами (тілами обертання) ротора. Для цього тіла обертання в осьовому перерізі мають форму трапецій, а проміжок між ними регулюють шляхом осьового зміщення ротора відносно валу на величину, що дорівнює товщині регулювальної шайби (або набору шайб), розміщеної між упором валу і торцем осьової втулки.

Технічний результат полягає в можливості зменшення витрати на здійснення технологічних процесів, оскільки завдяки збільшенню кратності обробки середовища в апараті значно зростає глибина цих процесів, а, відповідно, відпадає необхідність у подальшій додатковій обробці середовища.

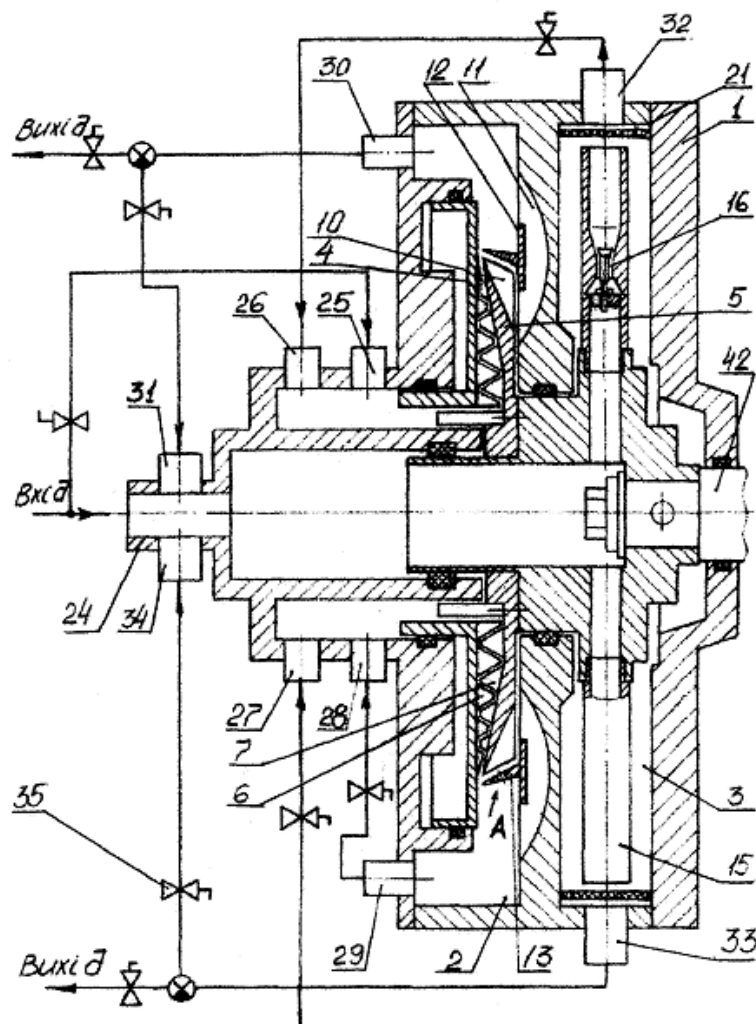
Недоліками конструкції є розміщення вхідного патрубка в нижній частині апарату, оскільки кріпильні елементи, що фіксують апарат будуть заважати нормальному доступу до вхідного патрубка. Також проблемно регулювати кількість циклів проходження оброблюваного середовища через робочі органи перед його вивантаженням з апарату.



1 – корпус; 2 – вхідний патрубок; 3 – вихідний патрубок; 4 – кришка з статором; 5 – привідний вал; 6 – втулка; 7 – лопаті; 8 – напрямна труба; 9 – гвинти; 10 – ротор; 11 – кільцевий простір; 12 – набір шайб.

Рисунок 1.5 – Ротроно-пульсаційний апарат

Особливостями конструкції апарату зображеного на рисунок 1.6 [8] є те, що у проточних кавітаторах 16 каверна утворюється при обтіканні конусної голівки 17. У пропонуваному пристрої використовують дві схеми роботи кавітатора 16: перша жорстка, при якій голівка 17 установлюється на постійній відстані від початкової точки розширення каналу. Регулювання положення голівки 17 виконується при вгвинчуванні або вигвинчуванні гвинта 18 з наступною фіксацією у заданому положенні гайкою 19. А друга пружна схема, при якій використовується пружний елемент-пружина 20, що дозволяє голівці 17 робити поздовжні коливання. У цьому випадку голівка 17 встановлюється на визначеній відстані від початкової точки розширення каналу. У процесі роботи, під дією виникаючих зусиль, голівка 17 робить осьові коливання, що інтенсифікує кавітаційний вплив на оброблюване середовище.



Фіг. 1

1 – корпус; 2, 3 – камери обробки; 4 – статор; 5 – ротор; 6, 7 – турбулізуючі елементи; 10 – радіальні канали; 11 – канал; 12 – диск; 13 – виступи; 15 – ротор; 16 – проточні кавітатори; 21 – кільце; 24 – вхідний канал; 25 – канал подачі необроблюваного середовища; 26 – канал подачі активного середовища; 27 – канал для подачі додаткових компонентів; 28 – канал для подачі обробленого середовища; 29 – канал виходу оброблюваного середовища для рециркуляції; 30 – канал виходу оброблюваного середовища; 31 – канал на рециркуляцію в камері 3; 32 – канал виходу активного середовища; 33 – вихідний канал для подачі на рециркуляцію активного середовища; 34 – канал виходу готової продукції; 35 – запірна арматура; 42 – привідний вал.

Рисунок 1.6 – Роторно-пульсаційний апарат

Технічний результат полягає в тому, що збільшення радіальних каналів 8 статора 4 зі зменшенням їхнього поперечного перерізу в міру видалення від центральної частини статора 4, приводить до збільшення швидкості потоку на периферії статора і ротора і зменшенню тиску, а також до збільшення часу перебування суміші в активній робочій зоні, що забезпечує потужний вплив на оброблюване середовище. В міру видалення суміші від центра обертання ротора 5, за рахунок зменшення розмірів турбулізуючих елементів 6 і 7 та збільшення окружної швидкості середовища, відбувається активація кавітаційної обробки.

Недоліками конструкції є габарити установки в цілому та наявність великої кількості додаткового обладнання для повноцінного функціонування апарату. Складність в обслуговуванні апарату при експлуатації. Також значні питомі витрати енергії на оброблення середовища в апараті.

На основі проведеного аналізу недоліків патентних джерел встановлено напрямки для покращення конструкції роторно-пульсаційного апарату та його проектування. Також виявлені тенденції розвитку конструкцій апаратів для оброблення різних середовищ.

### **1.3 Аналіз моделей гідродинамічних характеристик роторно-пульсаційного апарату**

РПА призначені для інтенсифікації хіміко-технологічних процесів, основний вплив на оброблюване середовище проходить за рахунок гідроакустичних та гідродинамічних факторів, та основною фазою являється рідина. Отже процеси, що проходять в РПА відносяться до гетерогенних процесів та діляться на групи “рідина – рідина”; “рідина – газ”; “рідина – тверде тіло”. Найбільш ефективним РПА може бути в таких процесах, як емульгування, диспергування, екстракція, розчинення та гомогенізація [9].

Для гетерогенних процесів групи “рідина – рідина” у більшості публікацій [10, 11] базовим рівнянням на основі якого визначаються гідродинамічні параметри течії рідини в РПА, є нестационарне рівняння Бернуллі:

$$\beta \cdot l_e \cdot \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{2} \left( \xi(t) + \frac{B(t) \cdot \mu}{d_e \cdot \rho \cdot V} \right) = \frac{\Delta P(t)}{\rho} \quad (1.1)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт кількості руху;

$l_e$  – довжина шляху рідини в пульсаторі, м;

$d_e$  – еквівалентний гідравлічний діаметр, м;

$\xi(t)$  – сумарний коефіцієнт місцевих гідравлічних опорів;

$B(t)$  – коефіцієнт гідравлічного опору, що враховує втрати напору;

$\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;

$V$  – швидкість потоку рідини по каналу пульсатора, м/с;

$\Delta P(t)$  – перепад тиску, Па.

Розв'язок даного рівняння надає змогу визначити залежності  $dV(t)/dt$ ,  $V(t)$ . Оскільки без цих даних неможливо визначити витратні та динамічні параметри потоку рідини в апараті, дане рівняння раціонально використовувати при моделювання руху в'язко текучого оброблюваного середовища в каналах робочих органів РПА.

Характер та параметри руху рідини в каналах робочих органів РПА відіграють велику роль при описі кінетики більшості хіміко-технологічних процесів, що протікають в апараті. Значний вклад в розвиток моделей “рідина – газ”, а саме при проходженні газорідинного середовища через робочі органи РПА зробив Юдаєв В.Ф. [12]. Також новий розвиток теорії нестационарних гідродинамічних процесів описано в роботах Зіміна А. І [13]. Часто використовуване для опису середньої швидкості руху рідини в каналах рівняння Бернуллі модернізували до вигляду:

$$\left[ l_{eq} + \left( 1 + \sqrt{\frac{S_{out}}{S_{in}}} \right) \cdot \sqrt{\frac{S_{out}}{\pi}} \right] \cdot \frac{dU}{dt} + \frac{1}{2} \cdot \left( \xi(t) U^2 + \frac{B(t) U \mu}{d_{eq} \cdot \rho} \right) = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\omega^2 \cdot R_d^2}{2} \quad (1.2)$$

де  $l_{eq}$  – еквівалентна довжина каналів РПА;

$S_{in}$  ,  $S_{out}$  – площі поперечного перерізу каналів у внутрішньому та зовнішньому циліндрах відповідно, м;

$U(t)$  – середня по перерізу каналу швидкість рідини в радіальному напрямі;

$\xi(t)$  – коефіцієнт гідравлічного опору;

$B(t)$  – коефіцієнт гідравлічні втрати;

$d_{eq}$  – еквівалентний діаметр прохідного перерізу;

$\rho$  – щільність рідини;

$\Delta P$  – статичний перепад тиску між порожниною ротора та камерою статора;

$\omega$  - кутова швидкість обертання ротора;

$\omega$  – кутова швидкість обертання ротора;

$\delta$  – товщина радіального зазору між ротором та статором;

$R_d = R_{in} + \delta/2$  – найбільший радіус внутрішнього циліндр.

Коефіцієнти гідравлічного опору, що входять до складу рівняння визначають швидкість потоку рідини в РПА. Для розрахунку коефіцієнтів необхідно знати величину площі прохідного перерізу. В роботах Орлова С. Е., Василюшин М. С. [14] наведений алгоритм розрахунку площі прохідного перерізу багато ступінчатого РПА. Що значно покращує можливість використання даної моделі для розрахунку та проектування різних видів РПА.

Для групи “рідина – тверде тіло“, а саме для диспергування твердих часток у рідкому середовищі було сформульовано математичну модель витратно-напірної характеристики Балабудкіним М.А.

$$H = 2 \cdot \psi \cdot (\pi \cdot n)^2 \cdot S_1 \cdot (d_p^3 + d_p^B) - \frac{(Q \cdot \pi \cdot D)^2}{(\varphi \cdot b \cdot \Delta)^2}, \text{ м}, \quad (1.3)$$

де  $\psi$  – коефіцієнт напору;

$n$  – частота обертання, с-1;

$S_1$  – товщина циліндрів ротора і статора, м;

$d_{p3}$  – зовнішній діаметр роторного кільця, м;

$d_{pB}$  – внутрішній діаметр роторного кільця, м;

$Q$  – продуктивність, м<sup>3</sup>/с;

$D$  – середній діаметр пульсаційного вузла, м;

$\varphi$  – коефіцієнт витрати;

$b$  – висота прорізей ротора і статора, м;

$\Delta$  – пропускна площа кілець пульсаційного вузла, м<sup>2</sup>.

Дана математична модель дає змогу розрахувати напір, що створює апарат при будь-якій кількості ступіней, оскільки вона враховує зміну приросту напору при проходженні оброблюваного середовища через одну ступінь. Також необхідність визначення для кожного випадку окремо коефіцієнтів втрат є великим недоліком даної моделі, що викликає обмежене використання її при розробці нових конструкцій РПА.

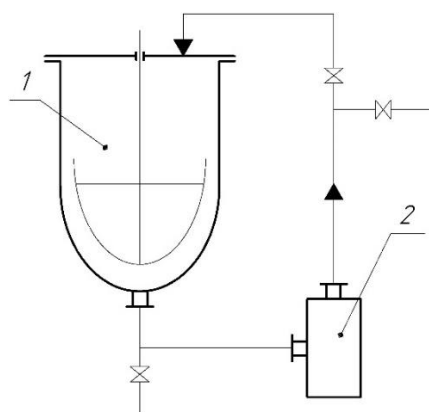
#### **1.4 Принцип використання роторно-пульсаційних апаратів в технологічних лініях**

Роторно-пульсаційні апарати використовуються в різноманітних технологічних схемах новітніх та енергозберігаючих виробництв, в різних видах та компонованнях з іншим обладнанням.

Найпростішим способом використання РПА в різних періодичних виробничих процесах та в лабораторній практиці є циркуляція оброблюваного середовища через робочі органи апарату. При цьому може бути використана внутрішня циркуляція, коли занурюваний або вмонтований РПА встановлений безпосередньо в ємкості з оброблюваним середовищем, або зовнішня циркуляція, коли РПА прохідного типу встановлений в зовнішньому циркуляційному контурі. В більшості випадків ефективна зовнішня циркуляція оброблюваного середовища через РПА прохідного типу, що зображена на рисунку 1.7 включає в себе ємність – 1 та РПА – 2, встановлений в циркуляційний контур замкнений на ємкості з перемішуючим пристроєм, куди завантажують оброблюване середовище. Недоліком схеми являється те, що весь об'єм оброблюваного середовища не з однаковою кратністю проходить



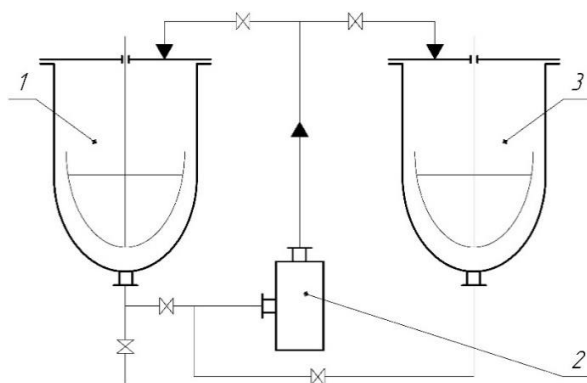
через РПА, що призводить до неоднорідності отриманої продукції по степені диспергування та збільшенню виробничого циклу.



1 – ємкісний апарат; 2 – РПА.

Рисунок 1.7 – Циркуляційна схема

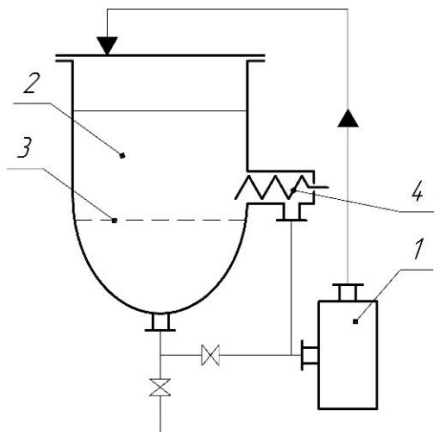
Для усунення зазначених недоліків використовують схему перегрузок наведену на рисунку 1.8. Схема обробки дисперсних середовищ має додаткову ємність – 3 та систему трубопроводів, що дозволяє виконувати перегрузку через РПА – 2 оброблюваного середовища із однієї ємності – 3 в іншу ємність – 1 і назад. При цьому забезпечується строго певна кратність обробки всього об’єму середовища, що відповідає числу перегрузок. Недоліком є ускладнене використання даної схеми для середовищ з високим вмістом твердої фази при екстрагуванні, коли потрібно отримати концентровані екстракти. Навіть при наявності додаткових живильників можливе забивання РПА, також в робочій зоні РПА не забезпечуються оптимальні гідродинамічні умови омивання частинок сировини екстрактом [15].



1, 3 – ємкісні апарати; 2 – РПА.

Рисунок 1.8 – Схема перегрузок

Для проведення процесів екстрагування при підвищеному вмісті твердої фази існує схема з різною кратністю циркуляції фаз рисунок 1.9. Спосіб базується на циркуляції оброблюваного середовища через РПА з різною кратністю по твердій та рідкій фазах. В наведеній схемі РПА – 1 встановлений в циркуляційний контур, замкнутий на ємності – 2, наприклад екстрактор з ложним дном – 3. Рідка фаза подається в РПА з нижньої камери ємності, а тверда фаза дозується живильником, наприклад шнеком – 4 з верхньої камери. Різна кількість циркуляції рідкої та твердої фази дозволяє забезпечити високу надійність при сприятливих гідродинамічних умовах інтенсифікації процесу в апараті [16].



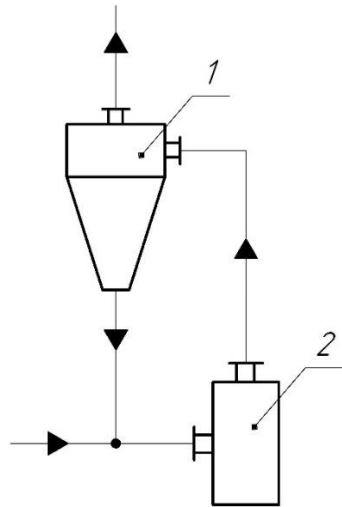
1 – РПА; 2 – ємнісний апарат; 3 – ложное дно; 4 – шнек.

Рисунок 1.9 – Схема з різною кратністю циркуляції фаз

Для підвищення ефективності використання способу перегрузок через РПА та циркуляційного способу в процесах приготування тонкодисперсних середовищ використовують гідроциклони в додатковому циркуляційному контурі, що замкнений на РПА. Використання гідроциклонів в процесах приготування середовищ з тонкодисперсною фазою може забезпечити отримання продукту з заданим розміром дисперсних частинок. При цьому можуть використовуватись різні схеми включення гідроциклонів.

При схемі з повірочною класифікацією рисунок 1.10 гідроциклон – 1 розділяє отриману в РПА – 2 суспензію на вилучений тонкодисперсний

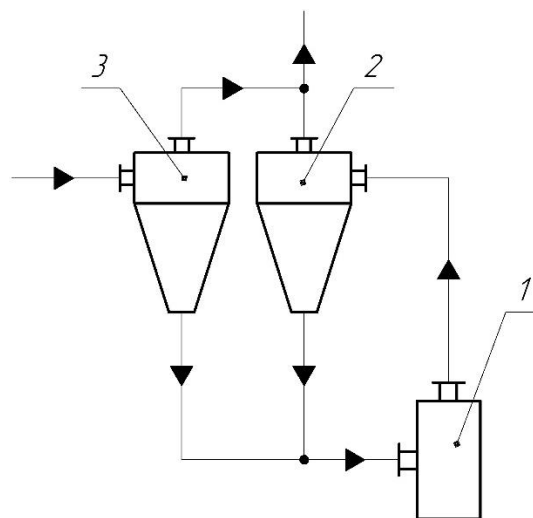
продукт та крупну фракцію, що повертається в апарат разом з наступною вихідною суспензією.



1 – гідроциклон; 2 – РПА.

Рисунок – 1.10 Схема з повірочною класифікацією

При використанні схеми з попередньою і повірочною класифікацією рисунок 1.11 вихідну суспензію отриману в РПА – 1, подають в гідроциклон – 2, 3 з яких тонкі фракції видаляють, а крупнодисперсний продукт направляють в РПА. Наведена технологічна схема виключає зайву обробку в РПА тонкодисперсних фракцій, що містяться у вихідній суспензії. В даному випадку два циклона можуть бути замінені на один, в якому за допомогою насоса будуть подавати вихідну та оброблювану суспензії.



1 – РПА; 2, 3 – гідроциклон.

Рисунок – 1.11 Схема з попередньою і повірочною класифікацією

Таким чином використання РПА дозволяє при підвищенні якості отриманої продукції значно інтенсифікувати приготування суспензій і значно скоротити витрати часу та енергії, зменшити кількість використаного обладнання та число проміжних операцій. При цьому отриманий ефект в більшій степені залежить від параметрів РПА та міцності частинок твердих компонентів [17].

Основні зусилля в наукових роботах спрямовані на покращення технологічних схем з використанням РПА за рахунок зміни режимів роботи апарату, компонування та конфігурації робочих органів. Основні параметри апарату знаходяться зазвичай знаходяться в таких межах: зазор між ротором і статором РПА 0,15...0,3 мм, частота обертання ротора РПА 1000...3000 об/хв, час обробки 500...750 с, температурний режим 10...60 °С регулюються з іншими параметрами під обробку оброблюваного середовища індивідуально.

## **1.5 Висновки до розділу**

1. За результатами аналізу публікацій, патентної інформації і літературних джерел підтверджено актуальність теми магістерської дисертації.
2. Визначено сучасні підходи до математичного опису залежностей, що визначають енергетичні характеристики потоку рідини при її русі в роторно-пульсаційному апараті.
3. Визначено основні тенденції вдосконалення конструкцій роторно-пульсаційних апаратів.
4. Встановлено підходи до промислового застосування РПА у виробничих циклах.
5. За результатами аналітичного огляду підходів до визначення залежностей, що описують гідродинамічні характеристики РПА, стану розвитку конструкцій роторно-пульсаційних апаратів, а також технологічних рішень на їх основі, сформульовано мету та задачі досліджень.

## 1.6 Мета та задачі дослідження

Встановлення закономірностей, процесу перетворення енергії у потоках рідини в одноступінчастому роторно-пульсаційному апараті та вдосконалення конструкції РПА.

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні завдання дослідження:

- Сформулювати фізичну модель процесів що протікають в роторно-пульсаційному апараті.
- Розробити математичний опис процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті.
- Скласти методики експериментальних досліджень та аналізу дослідних даних.
- Створити лабораторну установку для проведення експериментальних досліджень гідродинаміки роторно-пульсаційного апарату.
- Перевірити адекватність математичного опису дослідним даним.
- За результатами дослідження встановити функціональні закономірності перепаду тиску в апараті від витрати оброблюваної рідини і частоти пульсацій та потужності двигуна від витрати оброблюваної рідини і числа обертів приводного валу.
- Встановити вплив конфігурації робочих органів на гідродинамічні характеристики роторно-пульсаційного апарату.
- Скласти алгоритм методики розрахунку роторно-пульсаційного апарату.
- Розробити конструкцію роторно-пульсаційного апарату.

## **2. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ У ПОТОКАХ РІДИНИ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ**

### **2.1 Фізична модель процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті.**

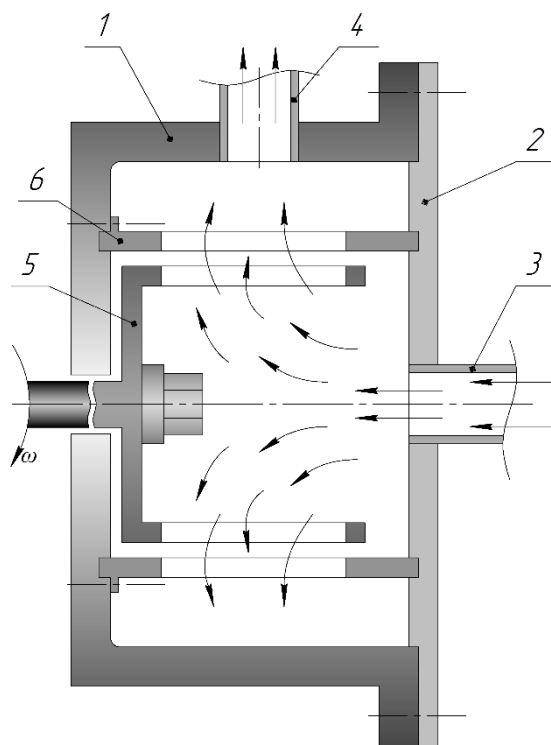
Загальний підхід до моделювання процесів в роторно-пульсаційному апараті. РПА набули значного поширення у промисловості зарекомендувавши себе як ефективне обладнання для проведення гідромеханічних і масообмінних процесів. Вони забезпечують інтенсивну обробку рідин, що досягається шляхом сукупної дії високочастотних змінних за величиною навантажень, що спричинені різними за природою явищами, основними серед яких є пульсації тиску і швидкості потоку, зсувні та ріжучі зусилля, розвинена турбулентність та інтенсивна кавітація, які діють циклічно зі змінним за величиною навантаженням рідини [18]. Різноманітність процесів, що проводяться в РПА зумовлює велику кількість варіантів конструкцій, що відрізняються конфігурацією робочих органів та пристроїв підведення та відведення речовин. Це змінює баланс між ступенями прояву окремих впливів, залишаючи при цьому незмінним принцип дії апарата, який полягає у наступному. Оброблювана рідина, що надходить в апарат через вхідний патрубок, потрапляє до робочої камери у вигляді встановлених із зазором співвісних циліндрів закріплених на обертовому роторі і статорі таким чином, що у радіальному напрямі за кожним циліндром ротора йде циліндр статора. Для прокачування рідини бічні поверхні циліндрів мають прорізані отвори. При проходженні робочої камери рідина прокачується через прорізи ротора та статора, які періодично перекриваються в наслідок обертання ротора. В той проміжок часу, коли прорізи статорів перекриті бічними стінками роторів, потік гальмується у радіальному напрямі і частина рідини у комірках, утворених прорізами ротора і бічними стінками статорів, транспортується у коловому напрямі. Коли ж прорізи роторів і статорів поєднуються – потік

пришвидшується у радіальному напрямі. При цьому у зазорах між роторами і статорами утворюється високоградієнтний потік рідини [19].

Однією із нагальних проблем дослідження процесів, що відбуваються в РПА є визначення витрат енергії, необхідних для подолання сил тертя в зазорах між статорами і роторами, оскільки на подолання гідродинамічного тертя припадає суттєва доля енерговитрат апарата.

Наявні залежності для визначення потужності, необхідної для подолання сил гідродинамічного тертя, виведені для окремих режимів роботи РПА, причому, у більшості випадків, автори залежностей не наводять межі їх застосування як за режимами, так і за конструкційними параметрами апаратів. Це не дозволяє розраховувати РПА, що мають типорозмірні відмінності від тих конструкцій, для яких були встановлені ці залежності.

Схема розподілення потоків рідини в РПА наведена на рисунку 2.1.



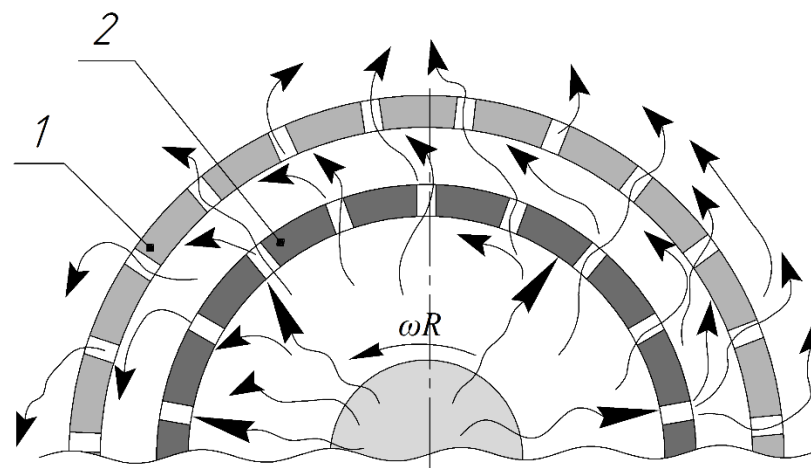
- 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – завантажувальний патрубок;  
4 – вивантажувальний патрубок; 5 – ротор; 6 – статор.

Рисунок 2.1 – Схема розподілення потоків рідини в РПА

Роторно-пульсаційний апарат рисунок 2.1 працює в такий спосіб. Рідина подається всередину апарату через завантажувальний патрубок 3, що

розташований на кришці 2 і потрапляє в зону дії робочих органів ротора 5 і статора 6, під впливом яких рідина обробляється. Робочі органи циліндричної форми с прорізами в бічних поверхнях, також для підвищення напору на роторі встановлено крилатку. Після обробки рідина витікає у порожнину між робочими органами і корпусом 1, звідки відводиться через розвантажувальний патрубок 4.

У робочому режимі РПА потік рідини подається у внутрішню порожнину набірного робочого органу у вигляді концентрично розміщених циліндричних тіл обертання, ротора і статора, в якій передбачено можливість встановлення лопатевої крилатки, створена відцентрова сила спрямовує потік у радіальному напрямку до прорізе на бічній поверхні внутрішнього циліндра робочого органу. Проходячи крізь перфорацію внутрішнього циліндра суцільність потоку порушується з подальшим розділяється на менші потоки, частина з яких потрапляє у зазор між парою циліндрів статора і ротора, а інша частина надходить у прорізи наступного циліндра. На виході з пульсаційного вузла у корпусі апарату потоки знову з'єднуються у єдиний потік. Схему розподілення потоків між робочими органами пульсаційного вузла зображено на рисунку 2.2.



1 – статор; 2 – ротор.

Рисунок 2.2 – Схема розподілу потоків між робочими органами пульсаційного вузла



## 2.2 Математична модель процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті

Аналіз фізичної моделі руху потоків рідини в роторно-пульсаційному апараті з циліндричними набірними робочими органами свідчить про подібність роботи апарату при прокачуванні рідини через пульсаційний вузол до роботи відцентрового насоса, що дозволяє сформулювати припущення для математичного опису гідродинамічних характеристик РПА.

Припустимо, що канали напірного елемента нерухомі, а рідина рухається по ним з тією ж відносною швидкістю, що і в каналах напірного елемента, який обертається (умова Ейлера). Кожна з абсолютних швидкостей руху рідини на вході в канали  $c_1$  і на виході з каналів  $c_2$  є геометричною сумою відносної і колової швидкостей, тому їх можна розкласти на відносні складові  $w_1$  і  $w_2$  (спрямовані вздовж прорізів) і окружні  $u_1$  і  $u_2$  (спрямовані по дотичній до кола обертання) складові, що наведені на рисунку 2.3.

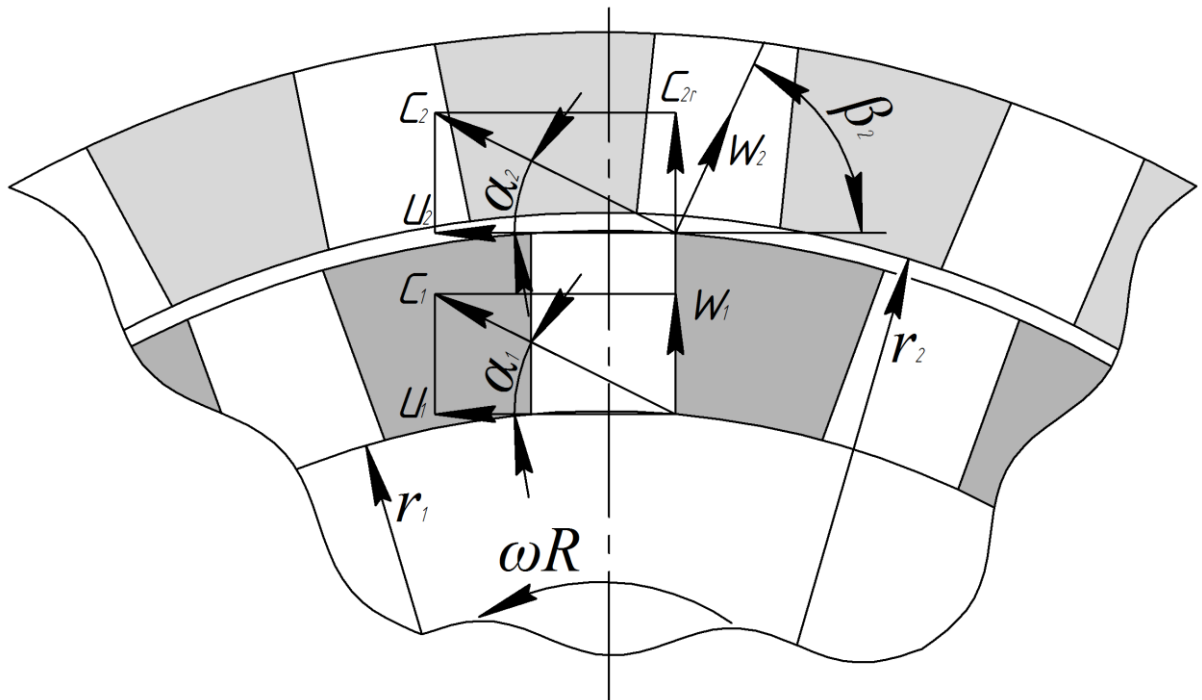


Рисунок 2.3 – Схема взаємного розташування векторів швидкості потоку та їх складових на вході і виході з напірного елемента.

Приймаючи за площину порівняння площину робочого циліндра на рівні 0 – 0, складемо баланс енергії рідини при проходженні її через циліндр ротора:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g}. \quad (2.1)$$

де  $p$  – тиск, Па.

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;

Складові  $\frac{p_1}{\rho g}$ ,  $\frac{p_2}{\rho g}$  рівняння (2.1) виражають п'єзометричний напір на вході і виході із циліндра, складові  $\frac{w_1^2}{2g}$ ,  $\frac{w_2^2}{2g}$  – виражають швидкісний напір на вході і виході із циліндра, м.

Оскільки визначення зміни питомої величини енергії потоку рідини здійснюється на одному рівні, то геометричні складові напору  $z_1 = z_2$  у рівнянні (2.1) не враховуються.

При обертанні циліндра рідина на виході накопичує додаткову енергію, що дорівнює роботі відцентрової сили на шляху довжиною  $r_1 \rightarrow r_2$ , що необхідно врахувати необхідною складовою у рівнянні (2.1):

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} - A_C. \quad (2.2)$$

де  $A_C$  – питома робота відцентрової сили, віднесена до одиниці ваги рідини.

Робота  $A_C$ , на шляху  $r_2 \rightarrow r_1$ , дорівнює:

$$A_C = \frac{1}{G} \int_{r_1}^{r_2} \frac{G}{g} \omega^2 r dr = \frac{\omega^2 (r_2^2 - r_1^2)}{2g} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}, \quad (2.3)$$

де  $n$  – частота обертання ротора, с<sup>-1</sup>;

$G$  – вага рідини, Н;

$r$  – поточний радіус обертання, м;

$u$  – лінійна швидкість обертання ротора, м/с;

$\omega$  – кутова швидкість, 1/с.

Перетворивши (2.2) із урахуванням (2.3) отримаємо:

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}. \quad (2.4)$$

У відповідності до рівняння Бернуллі напори рідини на вході і виході з циліндра, що обертається  $H_{\text{вх}}$  і  $H_{\text{вих}}$  становлять відповідно:

$$H_{\text{вх}} = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{c_1^2}{2g},$$

$$H_{\text{вих}} = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{c_2^2}{2g}.$$

Теоретичний напір, що створює напірний модуль за ідеальних умов (товщина розгінних елементів дорівнює нулю) рівний різниці напорів на вході і виході з нього:

$$H_T = H_{\text{вих}} - H_{\text{вх}} = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g}. \quad (2.5)$$

Підставляючи (2.4) у (2.5) отримаємо:

$$H_{T\infty} = H_{\text{вих}} - H_{\text{вх}} = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} = \frac{w_1^2 - w_2^2 + c_2^2 - c_1^2 + u_2^2 - u_1^2}{2g}. \quad (2.6)$$

З паралелограма швидкостей на вході в циліндр і виході із нього (рис. 2.4) маємо:

$$w_1^2 = u_1^2 + c_1^2 - 2u_1c_1 \cos \alpha_1, \quad (2.7)$$

$$w_2^2 = u_2^2 + c_2^2 - 2u_2c_2 \cos \alpha_2. \quad (2.8)$$

Рівняння (2.6) із урахуванням (2.7) і (2.8) набуде вигляду:

$$H_{T\infty} = \frac{u_2c_2 \cos \alpha_2 - u_1c_1 \cos \alpha_1}{g}. \quad (2.9)$$

$$c_2 \cos \alpha_2 = u_2 - c_{2r} \operatorname{ctg} \beta_2.$$

Рідина, на вході у нагнітаючий елемент, рухається по у прорізі циліндра в радіальному напрямку. В цьому випадку кут між абсолютним значенням швидкості рідини на вході в напірний елемент і окружною швидкістю  $\alpha_1 = 90^\circ$  (що відповідає умові безударного введення рідини в прорізи циліндра). Тоді  $\cos \alpha_1 = 0$  і рівняння (2.9) спрощується до вигляду:

$$H_{T\infty} = \frac{u_2 c_2 \cos \alpha_2}{g}.$$

Оскільки  $c_2 \cos \alpha_2 = u_2 - c_{2r} \operatorname{ctg} \beta_2$ ,

$$H_{T\infty} = \frac{u_2^2 - u_2 c_{2r} \operatorname{ctg} \beta_2}{g}. \quad (2.10)$$

Об'ємну витрату рідини, що проходить крізь напірний модуль можна представити як:

$$Q_V = z \cdot a \cdot l \cdot c_{2r}$$

де  $l$  – висота прорізів розгінного елемента. Звідси  $c_{2r} = Q_V / z \cdot a \cdot l$ .

Підставляючи значення  $c_{2r}$  у (2.10) отримаємо:

$$H_{T\infty} = \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2}{g} \cdot \frac{Q_V \cdot \operatorname{ctg} \beta_2}{z \cdot a \cdot l},$$

де  $d_2, d_1$  – зовнішній і внутрішній діаметри напірного елемента.

Враховуючи, що  $u_2 = \pi n d_2$ , запишемо:

$$H_{T\infty} = \frac{(\pi \cdot d_2 \cdot n)^2}{g} - \frac{\pi \cdot d_2 \cdot n}{g} \cdot \frac{Q_V \cdot \operatorname{ctg} \beta_2}{z \cdot a \cdot l}. \quad (2.11)$$

Реальний теоретичний напір дорівнює:

$$H_T = \chi H_{T\infty}, \quad (2.12)$$

де  $\chi$  – коефіцієнт, що враховує скінченну кількість лопатей нагнітального пристрою, або суцільних елементів між прорізами рухомого циліндра:

Підставляючи (2.11) у (2.12) отримаємо:

$$H_T = \frac{\chi (\pi \cdot d_2 \cdot n)^2}{g} - \frac{\chi \cdot \pi \cdot d_2 \cdot n \cdot \operatorname{ctg} \beta_2}{g \cdot z \cdot a \cdot l} \cdot Q_V. \quad (2.13)$$

Повний напір дорівнює різниці між величинами реального теоретичного напору і напору, втраченого на компенсацію втрат енергії, пов'язаної із подоланням опорів і змінами напрямку його руху:

$$H = H_T - H_B, \quad (2.14)$$

де  $H_B$  – втрати напору.

З аналізу фізичної моделі випливає, що при проходженні потоку крізь робочі органи РПА переважна частина втрат енергії пов'язана з подоланням місцевих опорів. Отже можна прийняти, що:

$$H_{\text{в}} = \zeta \frac{c_{2r}^2}{2g} = \zeta \cdot \frac{Q_v^2}{2g \cdot (z \cdot a \cdot l)^2}, \quad (2.15)$$

де  $\zeta$  – коефіцієнт пропорційності;

$z$  – кількість каналів у напірному модулі, шт;

$l$  – висота прорізів каналів у напірному модулі, м;

$a$  – ширина прорізів каналів у напірному модулі, м.

Підставляючи (2.13) і (2.15) у (2.14) отримаємо:

$$H = \frac{\chi(\pi \cdot d_2 \cdot n)^2}{g} - \frac{\chi \cdot \pi \cdot d_2 \cdot n \cdot \text{ctg} \beta_2}{g \cdot z \cdot a \cdot l} \cdot Q_v - \zeta \cdot \frac{Q_v^2}{2g(z \cdot a \cdot l)^2}. \quad (2.16)$$

Позначивши  $\frac{\chi(\pi \cdot d_2)^2}{g} = A$ ,  $\frac{\chi \cdot \pi \cdot d_2 \cdot \text{ctg} \beta_2}{g \cdot z \cdot a \cdot l} \cdot Q = B$ ,  $\frac{\zeta}{2g(z \cdot a \cdot l)^2} = C$ , запишемо

(2.16) у скороченому вигляді:

$$H = An^2 - BnQ_v - CQ_v^2. \quad (2.17)$$

Таким чином, напірно-витратна характеристика як окремо напірного модуля, так і РПА і цілому виражається квадратичної залежністю  $H = f(Q_v)$ , на яку впливають конструктивні параметри робочих органів РПА і кількість обертів напірного модуля (ротора). На вході у напірний модуль втрати енергії на подолання місцевих опорів відсутні, тому у рівнянні (2.17) остання складова дорівнює нулю і воно набуває лінійного вигляду.

## 2.3 Висновки до розділу

1. Обґрунтовано фізичну модель процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті, на основі аналізу руху рідини у пульсаційній ступені апарата. На основі фізичної моделі сформульовано положення математичного опису процесу.

2. Складено математичний опис процесу для визначення гідродинамічних характеристик РПА, що описує витрати енергії у ступені роторно-пульсаційного апарата. Одержано аналітичний розв'язок запропонованих рівнянь.

3. Встановлено аналітичний вираз залежності напору, що розвиває ротор РПА від частоти його обертання та об'ємної витрати рідини з урахуванням особливостей конструкції робочих органів апарата.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ У ПОТОКАХ РІДИНИ В РОТОРНО-ПУЛЬСАЦІЙНОМУ АПАРАТІ

#### 3.1 Опис експериментальної установки

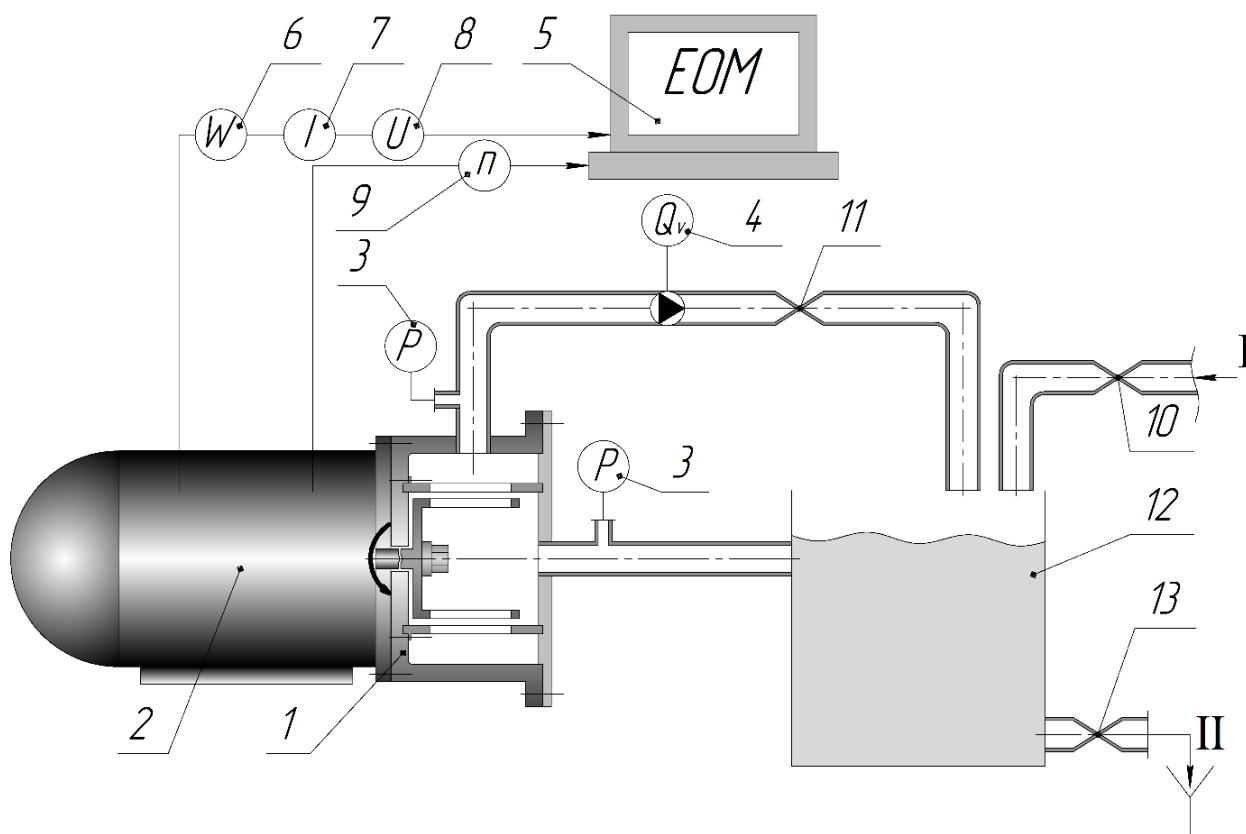
Метою проведення дослідження є:

- визначення гідродинамічних параметрів РПА;
- отримання закономірностей зміни об'ємної витрати ( $Q_v$ , м<sup>3</sup>/с), створеної робочими органами апарату, напору ( $H$ , м), потужності приводу  $W$ , Вт та гідравлічного коефіцієнту корисної дії  $\eta_r$  від частоти обертання ротора РПА  $n$ , с<sup>-1</sup>;
- отримання закономірностей зміни напору  $H$ , м та потужності приводу  $W$ , Вт від об'ємної витрати  $Q_v$ , м<sup>3</sup>/год.

Для встановлення гідродинамічних характеристик роторно-пульсаційного апарату створено експериментальну установку (рисунок 3.1), на базі РПА з робочими органами, що складаються з ротора і статора у вигляді встановлених співвісно порожнистих циліндричних тіл з перфорованою бічною поверхнею.

Визначення робочих параметрів РПА здійснюється за допомогою комп'ютерно інтегрованого вимірювального комплексу до складу якого входять: витратомір на виході з апарату, датчики току та напруги, датчик температури рідини в апараті. Всі зазначені елементи з'єднані через перетворювач сигналів з персональним комп'ютером, на якому проводяться визначення та реєстрація параметрів, що вимірюються. Крім того, для визначення величини тиску на вході і виході з апарату встановлені манометри зразкової точності. За необхідності визначення величини розрідження на вході в апарат замінюється на вакууметр аналогічної точності. Частота обертання приводного валу визначається за допомогою тахометра. Параметри електричного струму дублюються вимірюванням встановленим за місцем універсальним вимірювальним приладом типу К50 (амперметр, вольтметр, ватметр).

Схема експериментальної установки наведена на рисунку 3.1.



1 – роторно-пульсаційний апарат, 2 – електродвигун, 3 – прилади для вимірювання тиску, 4 – витратомір, 5 – комп'ютер, 6 – ватметр, 7 – датчик току, 8 – датчик напруги, 9 – тахометр, 10 – впускний вентиль, 11 – вентиль циркуляційний, 12 – накопичувальна ємність, 13 – вентиль для зливу.

I – лінія підведення рідини, II – лінія відведення рідини.

Рисунок 3.1 – Схема експериментальної установки

Конструкція установки передбачає можливість зміни витрати рідини та чистоти обертання ротора.

Експериментальна установка дозволяє проводити дослідження впливу конструкції і конфігурації робочих органів, а також режиму роботи роторно-пульсаційного апарату на його гідродинамічні характеристики і витрати енергії.



### 3.2 Методика проведення експериментальних досліджень

При проведенні досліджень у відповідності до стандарту ДСТУ 6134-2009 визначаються гідродинамічні характеристики РПА (об'ємна витрата, напір, частота обертання приводного валу, енергетичні характеристики, а також показники безпеки механічні, термічні, електричні). Дослідження проводяться при різному гідравлічному навантаженні на робочі органи РПА.

Дослідження проводяться на підготовленому стенді (рисунок 3.1), що забезпечує стандартні вимоги у відповідності до ДСТУ [20]. Вимірювальні прилади, що використовуються при визначенні параметрів відкалібровані та таровані. Тривалість досліджень встановлюється достатньою для отримання стабільних результатів з високим ступенем точності. Всі вимірювання в процесі дослідження проводяться при усталених режимах роботи. Підтвердження гарантованої точності досягається зняттям показників при різних режимах роботи. Умови досліджень вважаються стабільним, якщо значення отриманих даних об'ємної витрати, напору, потужності та частоти обертання приводного валу не залежать від часу. Розбіжність значень показників, що повторюються вказує на невідповідність умовам проведення дослідження.

Частоту обертання приводного валу при дослідженнях можливо встановлювати на рівні від 50 % до 120 % від встановленої розрахункової частоти, що необхідно для визначення об'ємної витрати, напору та споживаної потужності. Враховується, що відхилення на 20 % від розрахункової частоти обертання впливає на ККД. Для виконання умов дослідження використовують вентилі на вхідній та вихідній лініях апарату. Характеристики апарату можуть змінюватись в залежності від характеристик оброблюваного середовища. Основним фактором є зміна температури, для забезпечення нормальних умов необхідно встановлення проміжної накопичувальної ємності, що стабілізує режим роботи [20].

Для вимірювання об'ємної витрати використовувався метод вимірювання об'єму, що вимірює середню об'ємну витрату за період часу

потрібного для заповнення об'єму вимірювальної ємності. Даний метод по точності схожий до методу зважування. Об'ємний метод має свої похибки, що пов'язані з калібруванням резервуара, вимірювання рівнів, вимірювання часу заповнення, а також похибку, що пов'язана з відведенням рідини. Також потрібно постійно перевіряти герметичність з'єднань та якщо потрібно видаляти протікання [20].

Конструкція, установки зв'язана системою трубопроводів, що мають приєднані до них прилади вимірювання перепаду тиску. Потрібно брати до уваги, що діаметр труби та число Рейнольдса повинні знаходитись в допустимих межах для кожного з приладів. Прилади вимірювання потоку не повинні бути схильні до впливу кавітації або дегазації, що можуть виникати, наприклад в регульованому каналі. Наявність повітря можливо виявити при роботі повітряних клапанів на вимірювальних приладах. Необхідно мати змогу перевірити вимірювальні прилади перепаду тиску шляхом порівняння їх показників з показниками рідинного або з іншими калібрувальними стандартними методами вимірювання тиску. Якщо виконані всі вимоги стандарту, то коефіцієнт об'ємної витрати, що наведений в стандартах, може бути використаний без калібрування. Вимірювання об'ємної витрати у вигляді об'єму або маси рідини в одиницю часу допустимо здійснювати будь-яким із стандартних методів наведених в ДСТУ [20].

Необхідні значення для визначення напору вимірювати у вхідному та вихідному патрубках. Необхідно враховувати втрати від тертя рідини в трубі та на всьому відрізку між вхідним та вихідним вимірювальними перерізами, сумарний напір  $H$  апарату потрібно розраховувати за формулою:

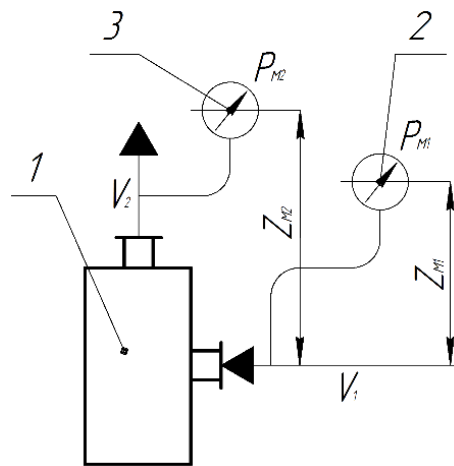
$$H = H_1 - H_2 + H_{j1} + H_{j2}$$

де  $H_1, H_2$  – сумарні напори у вимірювальних перерізах.

$H_{j1}, H_{j2}$  – місцеві втрати напору у вимірювальних перерізах.

Відповідно до умов встановлення апарату та розташування трубопроводів напір визначається вимірюванням перепаду тиску на вході и виході  $\Delta H$  або вимірюванням різниці тисків на вході и виході  $\frac{H_1 - H_2}{\rho \cdot g}$ , з

додаванням до них різниці швидкостей напору, якщо вона існує. Схема розташування вимірювальних приладів тиску наведена на (рисунку 3.2). Значення похибки загального напору можна отримати шляхом складання похибок окремих показників, таким чином спосіб проведення розрахунків залежить від методу проведення вимірювань. Вимірювання тиску проводиться по класу 1 у відповідності до ДСТУ 6134-2009. Відводи статичного тиску слід виконати у відповідності до вимог стандарту, вони не повинні мати задирок та нерівностей. Діаметр отворів для відбору тиску повинні бути від 3 до 6 мм, або рівні 1/10 діаметру труби. Внутрішня поверхня труб повинна бути чистою, гладкою, стійкою до хімічного впливу рідини що перекачується [20].



1 – РПА; 2 – манометр (вакууметр) на вході в апарат; 3 – манометр на виході з апарату.

Рисунок 3.2 – Схема розташування вимірювальних приладів

Вимірювання частоти обертання приводного валу проводиться шляхом підрахунку числа обертів за усталений період часу, для цього використовують тахометр, що забезпечує пряме вимірювання показників. Апарат приводиться в дію електродвигуном тому використання такого виду приладу є оптимальним [20].

Потужність апарату визначається вимірювання споживаної потужності двигуна та відомого його ККД при безпосередньому з'єднанні апарату з електродвигуном.

Вимірювання температури рідини здійснюється датчиком, що встановлений у корпусі на виході з апарата. Вимірювальна частина датчика температури повністю розміщена в оброблюване середовище.

Послідовність проведення дослідження та оформлення результатів. Перед початком досліджень потрібно перевірити та впевнитись у готовності стенду та вимірювальних приладів та обладнання до початку проведення досліджень. Дослідження проводять за програмою та методикою, що відповідають діючим стандартам [20], в послідовності та об'ємі потрібному для отримання достовірних значень в допустимих межах похибок.

На кожному режимі роботи слід вимірювати та фіксувати такі дані:

- частота обертання приводного валу, об/с;
- тиски на вході та виході з апарату, Па;
- потужність приводу РПА, Вт;
- силу струму, А;
- напругу, В;
- температуру рідини, °С;
- об'ємну витрату, м³/с.

Обробку результатів дослідження проводять у відповідності до інструкції щодо застосування використаних засобів вимірювання, а також по формулах, що виражають правила підрахунку кількісних значень потрібних показників по результатам вимірювань [20]

Формула для розрахунку сумарного напору  $H$  при дослідженні апарату за схемою наведеною на (рисунок 3.3) на якому зображено розташування на експериментальному стенді вимірювальних приладів тиску та розташування мірних перерізів на входному та вихідному патрубках коли гідравлічні втрати малі та можуть не враховуватись, після перетворення має вигляд [20].

$$H_u = 0,102 \cdot \frac{P_{m1} - P_{m2}}{\rho_u} + 0,0827 \cdot Q_u^2 \cdot \left( \frac{1}{d_2^4} - \frac{1}{d_1^4} \right) + \Delta Z_m$$

де  $Q_u$  – подача для вимірювального режиму, м³/с;

$\rho_u$  – густина оброблюваного середовища, кг/м³;

$P_{m1}, P_{m2}$  – показники приладів вимірювання тиску рідини на відповідних мірних перерізах на вході та виході з апарату, Па;

$d_1, d_2$  – внутрішній діаметр трубопроводу в мірних перерізах на відповідних лініях підведення та відведення апарату, м;

$\Delta Z_m$  – різниця положення поділок приладів для вимірювання тиску в мірному перерізі на виході з апарату по відношенню до вільного рівня рідини, м.

### **3.3 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях**

Тема дисертаційної роботи «Процес перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті».

Запровадження нових технологій та процесів, що спрямовані на полегшення праці чи підвищення її безпеки, часто пов'язане з появою нових чинників, що є загрозою життю та здоров'ю працівників. Експлуатація установки, яка пропонується в дисертаційній роботі теж супроводжується шкідливими та небезпечними чинниками (факторами) і має певний ризик.

Закон України про охорону праці зобов'язує забезпечити працюючих громадян безпечними умовами праці, що включає в себе вирішення питань безпеки праці, усунення причин травматизму і попередження професійних захворювань, аварійних ситуацій на виробництві; питання правової охорони праці. Усі працівники повинні бути ознайомлені з правилами і інструкціями з техніки безпеки і виробничої санітарії. Інструкції з техніки безпеки повинні знаходитися на робочих місцях, плакати, що ілюструють методи безпечного виконання робіт вивішуються на видних місцях. Однак, основною умовою зниження шкідливих факторів є обов'язкове виконання правил безпеки.

В даному розділі дисертації аналізуються умови праці робітника у виробничому приміщенні. Параметри робочого приміщення  $S = 75 \text{ м}^2$ ,  $V = 225 \text{ м}^3$ . На стадії обслуговування установки працює один робітник.

В продовж роботи установки є такі шкідливі та небезпечні фактори:

- повітря робочої зони;
- виробничий шум;
- вібрація;
- промислове освітлення;
- небезпека впливу частин, що рухаються та обертаються;
- електробезпека;
- пожежна небезпека.

### 3.3.1 Повітря робочої зони

Робота операторів на роторно-пульсаційному апараті відноситься до важкої фізичної роботи через те, що установка розташована зазвичай в лініях виробництв, що знаходяться в умовах шуму, пилу, робота проводиться в 3 зміни, цілодобово, у будь-який час року.

Значення величин температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні виробничого приміщення вказані у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Значення величин температури, відносної вологості та швидкості руху повітря у робочій зоні виробничого приміщення

Період року	Категорія робіт	Температура, °C		Відносна вологість, %		Швидкість руху, м/с	
		Опти-мальна	Факти-чна	Опти-мальна	Факти-чна	Опти-мальна	Факти-чна
Холодний період року	16	21-23	19-21	40-60	50-60	0,1	0,1
Теплий період року	16	22-24	22-25	40-60	50-60	0,1	0,2

Для підтримання необхідних кліматичних факторів, робоча зона забезпечується опаленням в зимовий час за допомогою водяного опалення з температурою теплоносія 70-90<sup>0</sup>С, та кондиціонуванням повітря у літній період у відповідності з ДСН 3.3.6.042-99.

При проектуванні штучної (механічної) загально обмінної вентиляції, яка призначена для вилучення з приміщення надлишків тепла, вологи та інших шкідливих виділень необхідно приймати розрахункові параметри згідно з СнП2.04.05 —91.

Розрахунок механічної вентиляції повинен включати визначення найбільш раціонального способу вилучення або попередження утворення токсичних, пожежо - чи вибухонебезпечних концентрацій пароповітряних сумішей (загальнообмінні або місцеві вентиляційні установки і системи); визначення необхідної кількості повітря для обмінної вентиляції виходячи із відомої кратності повітрообміну в приміщенні, кількості шкідливих речовин, які вилучаються з приміщення, або надлишкового тепла, яке необхідно асимілювати до санітарно - допустимих норм відповідно ГОСТ 12.1.005 — 88/98.

### **3.3.2 Виробничий шум**

Роторно-пульсаційний апарат працює в періодичному режимі і тому створюваний шум апарату є періодичним.

Основними джерелами шуму при роботі РПА є шум від його обертання, робочих органів ротора та електродвигуна.

Зниження рівня шуму досягається шляхом шумопоглинання. Щоб досягти максимального ефекту від застосування шумопоглинаючої облицьовки нею потрібно покрити не менше 60% площини.

Для зменшення шуму необхідно слідкувати за рівнем змащувальної речовини в підшипникових вузлах, герметичністю фланцевих з'єднань.

Для запобігання шуму необхідно вжити такі заходи:

– для спостереження та дистанційного контролю використовувати звукоізолюючі кабінки, в яких можна забезпечити практично зниження шуму до 70 дБА і нижче;

– персонал, який працює безпосередньо в лабораторії, необхідно забезпечити протишумовими навушниками ПШН-Б ГОСТ12.4.051.87, що знижують рівень шуму до 22...28 дБА, і протишумовими вкладишами „Беруши СТ-1” ТУУ25513947.002-99, що знижують рівень шуму до 16...20 дБА. Ці заходи дозволили знизити рівень шуму до рівня, що відповідає вимогам ДСН 3.3.6.037-99.

### **3.3.3 Вібрація**

Причиною появи вібрації є робота електродвигуна на установці.

Величина загальної технологічної вібрації на постійних робочих місцях при працюючій установці у виробничих приміщеннях не повинна перевищувати норм, установлених за ДСН 3.3.6.039–99.

Вібрація знижується за допомогою встановлених на установці захисних кожухів. А також за допомогою засобів індивідуального захисту. Для захисту рук використовуються рукавиці, вкладиші, прокладки. Для захисту ніг – спеціальне взуття, підметки, наколінники. Для захисту тіла – нагрудники, пояси, спеціальні костюми.

Для зменшення вібрацій що перевищують допустимі межі відповідно до ДСН 3.3.6.039-99, установку слід розміщувати на демпферному покритті.

Під час роботи з вібруючим обладнанням сумарний контакт з його вібруючими поверхнями не перевищує 75% тривалості робочої зміни. Понаднормові роботи з таким обладнанням не дозволяються.

Основними організаційно-технічними, санітарно-гігієнічними, лікувально-профілактичними та загальнооздоровчими заходами, що зменшують несприятливий вплив вібрації на працюючих, є:

- застосування заходів по заміні парку вібронебезпечних машин і обладнання, що експлуатуються, та вдосконалення існуючих технологічних



процесів і організації їх таким чином, щоб вібрації на робочих місцях, на робочих площадках, на підлозі робочого приміщення були вилучені або знижені до гранично допустимих величин;

- під час організації технологічних процесів передбачено заміну операцій, які виконуються вібруючим обладнанням, на процеси, вільні від вібрацій, що передаються через руки на організм працюючих;

- при неможливості повністю вилучити застосування вібруючих ручних інструментів і механізмів слід трудові операції, що супроводжуються контактом рук працюючих з вібруючими поверхнями, чергувати з роботами, вільними від вібрації, або з регламентованими перервами та активним відпочинком;

- відповідно до вимог ДНАОП 0.03-8.07-97, до роботи з машинами, що генерують вібрацію, допускаються особи не молодші 18 років, які пройшли попередній медичний огляд, мають відповідну кваліфікацію та пройшли навчання по правилах безпечного ведення робіт;

- на підприємстві є організовані спеціальні, ділянки по планово-попереджувальному ремонту вібруючих машин з обов'язковим після ремонтним контролем параметрів і генеруючих вібрацій;

- для профілактики вібраційної патології підготовку працівників вібронебезпечних професій проводяться по програмах, які передбачають оволодіння двома спеціальностями рівноцінної кваліфікації, що дозволить в подальшому, під час виявлення віброзахворювання, забезпечити переведення на іншу роботу;

- робота з вібруючим обладнанням проводиться в опалювальних приміщеннях з температурою повітря не менше ніж 18 °С при відносній вологості його від 40 до 60% та швидкості руху не більше ніж 0,2 м/с;

- під час роботи в холодний період року в неопалюваних приміщеннях або на відкритому повітрі, для періодичного обігрівання працюючих, передбачені опалювані приміщення з температурою повітря від 22 до 24 °С

при швидкості його руху не більше ніж 0,2 м/с і відносній вологості від 40 до 60%, а на робочих місцях передбачається місцеве обігрівання працюючих;

- проведення будь-яких робіт, які супроводжуються шумом, під час обідньої перерви в цехах, де застосовується віброінструмент, не дозволяється;

- всі працюючі з машинами, що генерують вібрацію, проходять періодичний медичний огляд відповідно до вимог ДНАОП 0.03-4.02-94;

- працюючі забезпечені антивібраційними рукавицями відповідно до вимог ДНАОП 0.00-4.26-96;

- зменшення вібрацій, що передаються на руки працюючих, забезпечується по шляху їх розповсюдження засобами віброізоляції та вібропоглинання, зокрема застосуванням пружинних і гумових амортизаторів, прокладок, облицювання рукояток вібропоглинальними матеріалами, застосуванням динамічних віброгасників, демпфуючих затискачів і т. ін.;

- перевірка наявності вібраційних характеристик у паспортах на новопридбані машини (в технічному паспорті машини приведені вібраційні характеристики і методи їх контролю відповідно до вимог ДСН 3.3.6.037-99), а під час їх відсутності проводиться вхідний контроль;

- вироби, що обробляються ручними інструментами, укладаються або закріплюються пристроями так, щоб усунути виникнення додаткових вібрацій виробу;

- виключення контакту працюючого з вібруючими поверхнями за межами робочого місця або робочої зони (установлення огорожень, сигналізації, блокування, попереджувальних написів і т. ін.);

### **3.3.4 Освітлення робочої зони**

Для лабораторії висотою до 4 м, в якому знаходиться роторно-пульсаційний апарат, передбачено природне та штучне освітлення. Для штучного освітлення найбільш підходить точкові джерела світла (лампи ДРЛ) та газорозрядні лампи денного освітлення типу ЛД, які мають велику світлову віддачу, великий строк служби.

Для освітлення використовуємо люмінесцентні лампи низького тиску: тип лампи ЛД 80; потужність 80 Вт. Газорозрядні лампи високого тиску: тип лампи ДРЛ; потужність 250 Вт. Лампи створюють світло, приблизне за яскравістю до природного.

### **3.3.5 Небезпека дії рухомих та обертових частин**

Найбільшу небезпеку для обслуговуючого персоналу при роботі з роторно-пульсаційним апаратом несе обертання робочих органів ротора та приводу електродвигуна, що є складовою частиною обладнання. Для запобігання травматизму всі небезпечні ділянки обладнані огорожами. Всі обертові механізми знаходяться в корпусах, що не дає змогу травмуватись персоналу.

### **3.3.6 Електробезпека**

Згідно з класифікацією приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом приміщення лабораторії відноситься до класу приміщень з підвищеною небезпекою. Класифікація приміщення за характером навколишнього середовища – вологе (відносна вологість повітря в приміщенні перевищує 75%).

Оскільки для роботи обладнання використовується струм напругою 220/380В та частотою 50 Гц, то використовують трьохфазну трьохпровідникову мережу з ізолюваною нейтраллю, оскільки вона дозволяє використовувати дві робочі напруги – лінійну та фазову. Мережа з ізолюваною нейтраллю в ізолюваному режимі є найбільш безпечною при доторканні до фазового проводу.

Причини ураження обслуговуючого персоналу електричним струмом можуть бути такими:

- помилкове включення установки;
- замикання на корпусі;

- випадки дотику людей до відкритих струмопровідних частин електроустаткування;
- старіння ізоляції і, як наслідок, втрата ізоляційних властивостей;
- дотик до частин установки, що можуть опинитися під напругою у випадку короткого замикання.

Міри, що забезпечують електробезпеку:

а) в робочому режимі:

- забезпечення неприступності струмоведучих частин (розміщення на неприступній висоті, більш 2,7 м., огороження зон підключення устаткування);
- надійно ізолюємо елементи конструкції, що проводять електричний струм ( $R \geq 0,5$  Ом – опір ізоляції);
- кабелі укладаємо в «рукави»;
- встановлюємо електричне блокування на огорожі струмоведучих частин;
- встановлюємо орієнтацію в електроустановках (попереджувальні сигнали та знаки; написи “220 В”, “380 В” та таблички; знаки високої напруги; відповідне розташування і колір неізольованих струмоведучих частин і ізоляції; фарбування органів управління у відмінний від інших колір і світлова ізоляція); обслуговуючому персоналу видаємо засоби захисту (діелектричні коврики, рукавички, індикатори струму та напруги);

б) в аварійному режимі : захисне заземлення (рисунок 3.3). Ці заходи проведені згідно ГОСТ 12.1.030 – 86.

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{U_{\phi}}{z + r_0} = \frac{220}{0,2 + 0,4} = 366,67 \text{ A} > 300 \text{ A}$$

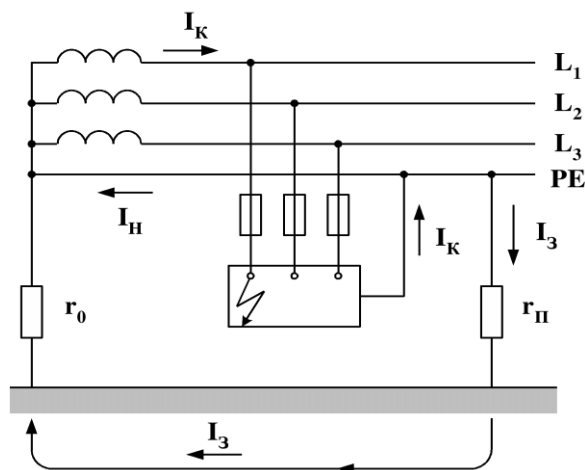


Рисунок 3.3 – Захисне заземлення

### 3.2.7 Пожежна безпека

Можливими причинами пожежі можуть бути: порушення технологічного процесу; паління в невстановленому місці; несправність електрообладнання та електропроводки; розряди статичної електрики.

В приміщенні встановлені димові повідомлювачі, які спрацьовують при появі диму.

Засобом захисту від статичної електрики є заземлення.

Першим засобом гасіння пожежі є вогнегасник, а також бочки з водою та ящики з піском.

Вогнегасники та пожежний інвентар мають червоне пофарбування, а бочки з водою та ящики з піском ще й відповідні написи білою фарбою. Пожежний інструмент фарбується у чорний колір.

Бочки для зберігання води з метою пожежогасіння встановлюються у виробничому приміщенні. Такі бочки повинні бути укомплектовані пожежним відром місткістю не менше 8 л.

Ящики для піску мають місткість 0,5; 1,0 або 3,0 м<sup>3</sup> та повинні бути укомплектовані совковою лопатою.

Протипожежні покривала, виготовлені з негорючого теплоізоляційного полотна, грубововняної тканини або повсті, повинні мати розмір не менш як 2х1 м та 2х2 м.

Перед початком роботи необхідно перевірити:

- 1) робоче місце, яке утримується в чистоті та порядку;
- 2) справність обладнання та його механізмів;
- 3) наявність та справність огорожень;
- 4) справність електрообладнання, відсутність пошкоджених зовнішніх проводів;
- 5) наявність та справність заземлення обладнання;
- 6) справність витяжної вентиляції, підключеної до установки;
- 7) справну роботу аварійної кнопки, “СТОП” та блокувальних пристроїв.

До обслуговування лінії допускаються особи, що пройшли спеціальне навчання та отримали право працювати на ній.

До обслуговування електрообладнання допускаються особи, що склали кваліфікаційній комісії іспит з ПУЕ електроустановок будь-якого типу, а також пройшли відповідний інструктаж на робочому місці.

В випадку якої-небудь небезпеки або поміченої несправності необхідно негайно зупинити установку натисканням аварійної кнопки “СТОП” та повідомити про це майстра.

### **3.4 Результати та аналіз експериментальних досліджень**

Обробка та аналіз отриманих експериментальних даних проводились за допомогою [21] та [22].

Результати визначення впливу зміни частоти обертання приводного валу на режимні параметри РПА узагальнені в закономірностях, наведених на рисунках 3.4, 3.5, 3.6. Наведені криві одержані за різних степенів відкриття прохідного перерізу потоку з регулюванням на вихідному трубопроводі. Діапазон степенів відкриття обраний в межах стійкої роботи апарата: нижній рівень – мінімальний прохід, що забезпечує стабільну циркуляцію води по контуру, верхній рівень – повністю відкритий прохід. Параметр степенів відкриття прохідного перерізу (СВ) введений для зручності аналізу і

визначається як відношення об'ємної витрати з частково відкритим прохідним перерізом до об'ємної витрати з повністю відкритим перерізом, визначених за номінальної частоти обертання приводного валу [23].

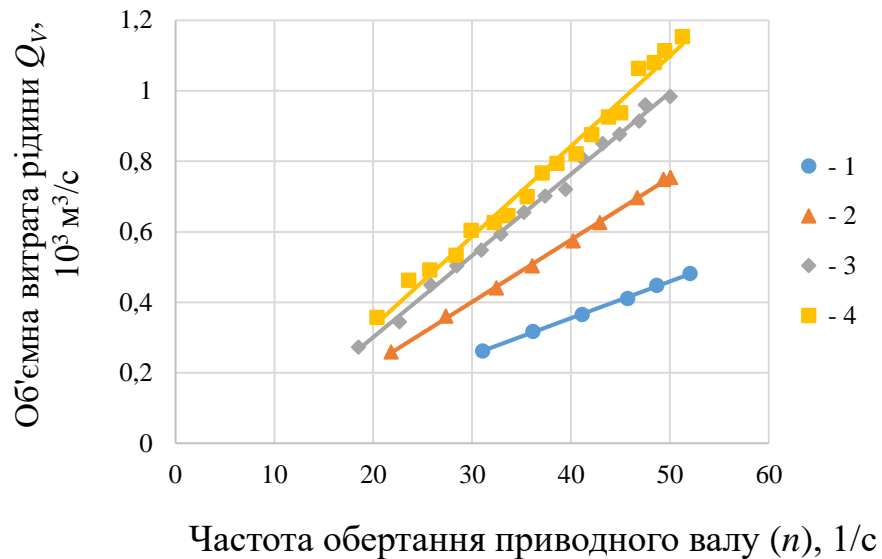


Рисунок 3.4 – Залежність об'ємної витрати рідини ( $Q_v$ ) від частоти обертання приводного валу ( $n$ ) для різних степенів перекриття прохідного перерізу потоку: 1 – СВ = 0,413; 2 – СВ = 0,676; 3 – СВ = 0,882; 4 – СВ = 1,000

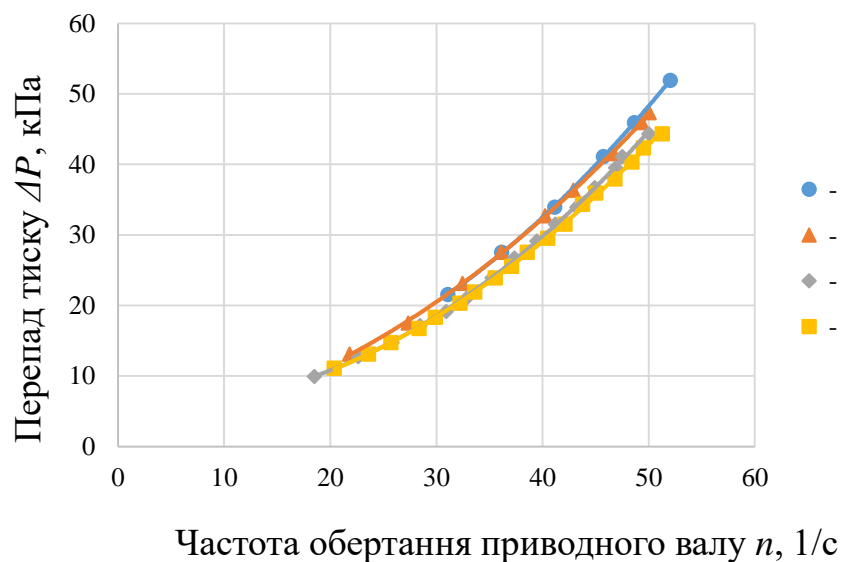


Рисунок 3.5 – Залежність перепаду тиску ( $\Delta P$ ) від частоти обертання приводного валу ( $n$ ) для різних степенів перекриття прохідного перерізу потоку: 1 – СВ = 0,413; 2 – СВ = 0,676; 3 – СВ = 0,882; 4 – СВ = 1,000

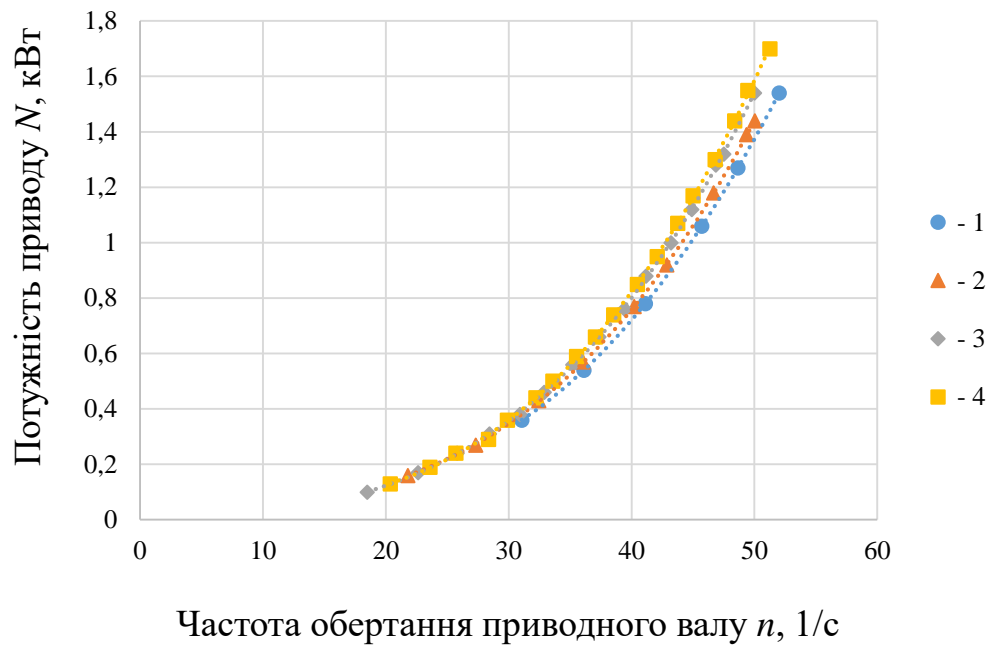


Рисунок 3.6 – Залежність потужності приводу ( $N$ ) від частоти обертання приводного валу ( $n$ ) для різних степенів перекриття прохідного перерізу потоку: 1 –  $CB = 0,413$ ; 2 –  $CB = 0,676$ ; 3 –  $CB = 0,882$ ; 4 –  $CB = 1,000$

З графіків наведених вище видно, що вплив СВ найбільше проявляється у залежностей об'ємної витрати рідини ( $Q_v$ ) від частоти обертання приводного валу  $n$ , натомість він мало впливає на залежності перепаду тиску ( $\Delta P$ ) і потужності приводу ( $N$ ) від частоти обертання приводного валу. Зменшення СВ призводить до нелінійно пропорційного збільшення мінімального значення  $n$ , за якого починається стабільна циркуляція води по контуру, що пояснюється нелінійним збільшенням величини гідравлічного опору контуру в місці перекриття перерізу потоку [25]. Цим же можна пояснити і розходження залежностей  $\Delta P = f(n)$  і  $N = f(n)$  за різних значень СВ по мірі збільшення  $n$ . Зменшення СВ, а отже і зменшення прохідного перерізу трубопроводу у лінії нагнітання, зумовлює збільшення  $\Delta P$  для досягнення однакової  $Q_v$ . У той же час, зменшення прокачування рідини по циркуляційному контуру зменшує і гідравлічні витрати, пов'язані з подоланням потоком води опору проходження робочих органів РПА, що дещо зменшує величину  $N$  [23].



Одноименні залежності на рисунках 3.4, 3.5, 3.6 зберігають форму для усіх значень СВ, але відрізняються параметрично. Результати апроксимації експериментальних залежностей поліноміальними функціями знаходяться у гарній відповідності з результатами вимірювань, що підтверджується значеннями коефіцієнта кореляції, які для всіх кривих, наведених на рисунках 3.4, 3.5, 3.6, перевищують 0,99. Це дає можливість встановити, що для дослідного РПА, як і для відцентрових насосів [24]:  $Q_v \sim n$ ,  $\Delta P \sim n^2$ ,  $N \sim n^3$ .

Залежності перепаду тиску в апараті, підведеної потужності приводу і гідравлічного ККД за постійної частоти обертання приводного валу при регулюванні об'ємної витрати наведені на рисунках 3.7, 3.8, 3.9. З графіків видно, що залежність  $\Delta P = f(Q_v)$  має виражено нелінійний низхідний характер, у той час, як залежність  $N = f(Q_v)$  має слабо виражений нелінійний висхідний вигляд. Це може бути пояснене достатньо великим значенням кута відхилення вектора швидкості руху потоку на виході з прорізів ротора від вектора лінійної швидкості ротора, що є наслідком малої довжини прорізів (малої товщини стінки ротора) і «зрізання» потоку статором, що близько розташований до ротора.

Аналогічно до відцентрових насосів [24], обидві залежності достатньо точно апроксимуються поліномами другого ступеня. У першому випадку наведеному на рисунку 3.7 коефіцієнт кореляції при апроксимації склав 0,95, а у другому випадку наведеному на рисунку 3.8 коефіцієнт кореляції при апроксимації склав 0,99.

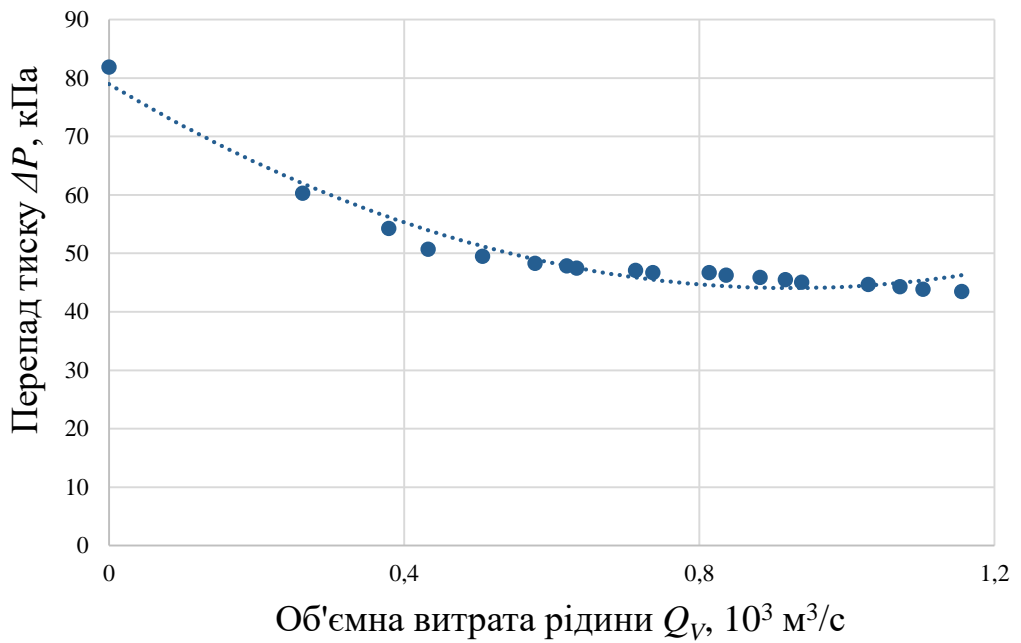


Рисунок 3.7 – Залежність перепаду тиску в апараті ( $\Delta P$ ) за постійної частоти обертання приводного валу ( $n$ ) при регулюванні об'ємної витрати ( $Q_v$ )

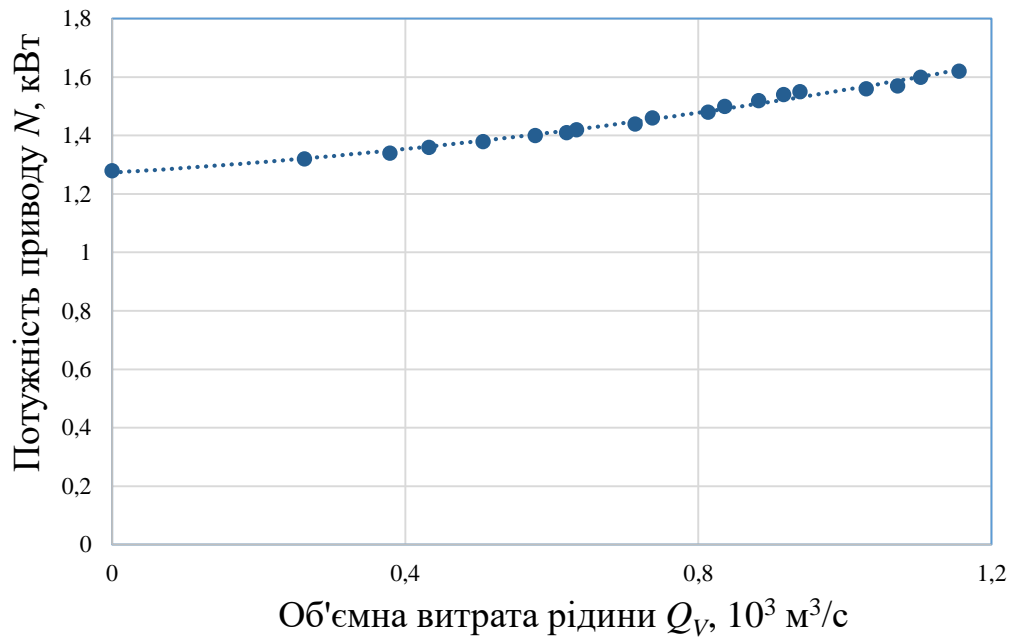


Рисунок 3.8 – Залежність потужності приводу ( $N$ ) від частоти обертання приводного валу ( $n$ ) при регулюванні об'ємної витрати ( $Q_v$ )

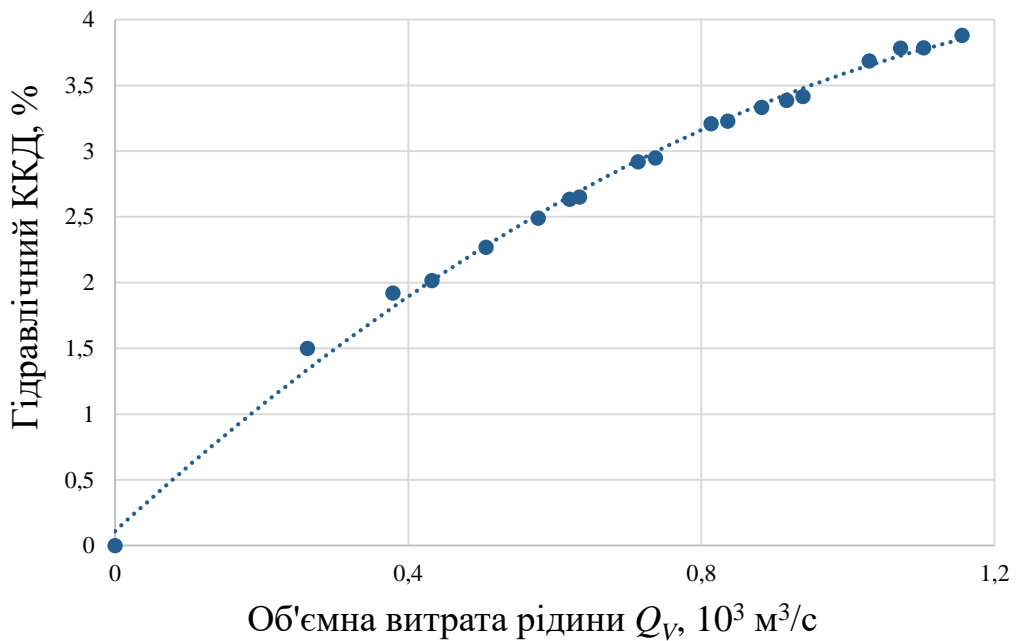


Рисунок 3.9. Залежність гідрравлічного ККД від об'ємної витрати ( $Q_v$ )

Гідродинамічна ефективність обладнання визначається його гідрравлічним ККД. Його розрахунок відповідно до [25] дозволив визначити залежність наведену на рисунку 3.9. За аналогією до залежностей на рисунку 3.7 та рисунку 3.8, ця залежність може бути апроксимована квадратичним поліномом (коефіцієнт кореляції 0,99). Із залежності видно, що у міру збільшення  $Q_v$  гідрравлічний ККД збільшується і за найбільшого значення об'ємної витрати досягає значення 4 %. Незважаючи на незначну величину гідрравлічного ККД, кількості енергії, що витрачається на прокачування рідини, цілком достатньо для створення різниці тиску, необхідної для забезпечення роботи РПА без використання додаткового обладнання та інтегрованих пристроїв. Крім того, ця складова енергії впливає (в апаратах з нагнітанням рідини – частково) на час перебування рідини в зоні дії робочих органів апарата, а тому, її важливо враховувати з технологічної точки зору [23].

Аналіз одержаних закономірностей свідчить про відповідність характеру однойменних закономірностей. Це вказує на відсутність якісного впливу наскрізної торцевої перфорації ротора невеликої площі на гідрравлічні

характеристики РПА. На підставі аналізу форми одержаних залежностей виявлено їх подібність до аналогічних закономірностей, що характеризують роботу відцентрового насоса. Це дає можливість використати теорію лопатевих машин для опису гідродинаміки РПА. При цьому вибір коефіцієнтів у виразах, що описують гідравлічні характеристики насосів, потребує додаткового обґрунтування з урахуванням результатів, одержаних для РПА [23].

Встановлено, що для дослідженої конструкції РПА гідродинамічна складова енерговитрат не перевищує 4 %, а отже не впливає суттєво на загальні витрати енергії в апараті. Це дозволяє спростити енергетичні розрахунки РПА дослідженої конструкції за використаних режимів роботи, і при їх виконанні, орієнтовно, приймати із запасом значення гідравлічної складової на рівні 5 % від розрахованих витрат енергії з подальшим уточненням розрахунку (за необхідності) [23].

### **3.5 Перевірка адекватності математичної моделі дослідним даним**

Перевірка адекватності математичної моделі дослідним даним здійснена шляхом співставлення результатів розрахунків напору за теоретично обґрунтованою закономірністю (2.17) зі значеннями напору, визначеними на основі експериментальних досліджень. При цьому враховано, що відповідно до встановленої закономірності наведеної на рисунку 3.4, об'ємна витрата лінійно залежить від частоти обертання ротора. Це дозволяє перейти від двопапетричної закономірності напору за виразом (2.17) до однопараметричної закономірності напору від об'ємної витрати або частоти обертання ротора. Причому з огляду на отримані закономірності  $\Delta P = f(n)$  і  $\Delta P = f(Q_v)$ , що наведені на рисунок 3.5 і 3.7, вказана однопараметрична залежність буде мати вигляд квадратичної параболи, рівняння якої для

випадку напірно-витратної характеристики у загальному вигляді запишеться у вигляді [23].

$$H = A_1 + B_1 Q_v + C_1 Q_v^2,$$

де  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  - константи, що залежать від особливостей конструкції робочих органів і корпусу РПА, або

$$\Delta P = \rho g (A_1 + B_1 Q_v + C_1 Q_v^2).$$

Результати порівняння значень перепаду тиску визначених експериментально і розрахованих за допомогою запропонованої залежності виражені графічно наведені на рисунку 3.10. Встановлено високий ступінь відповідності апроксимованої закономірності дослідним даним та розрахунковим даним, що підтверджується значенням коефіцієнта кореляції, що дорівнює  $R^2=0,9986$ .

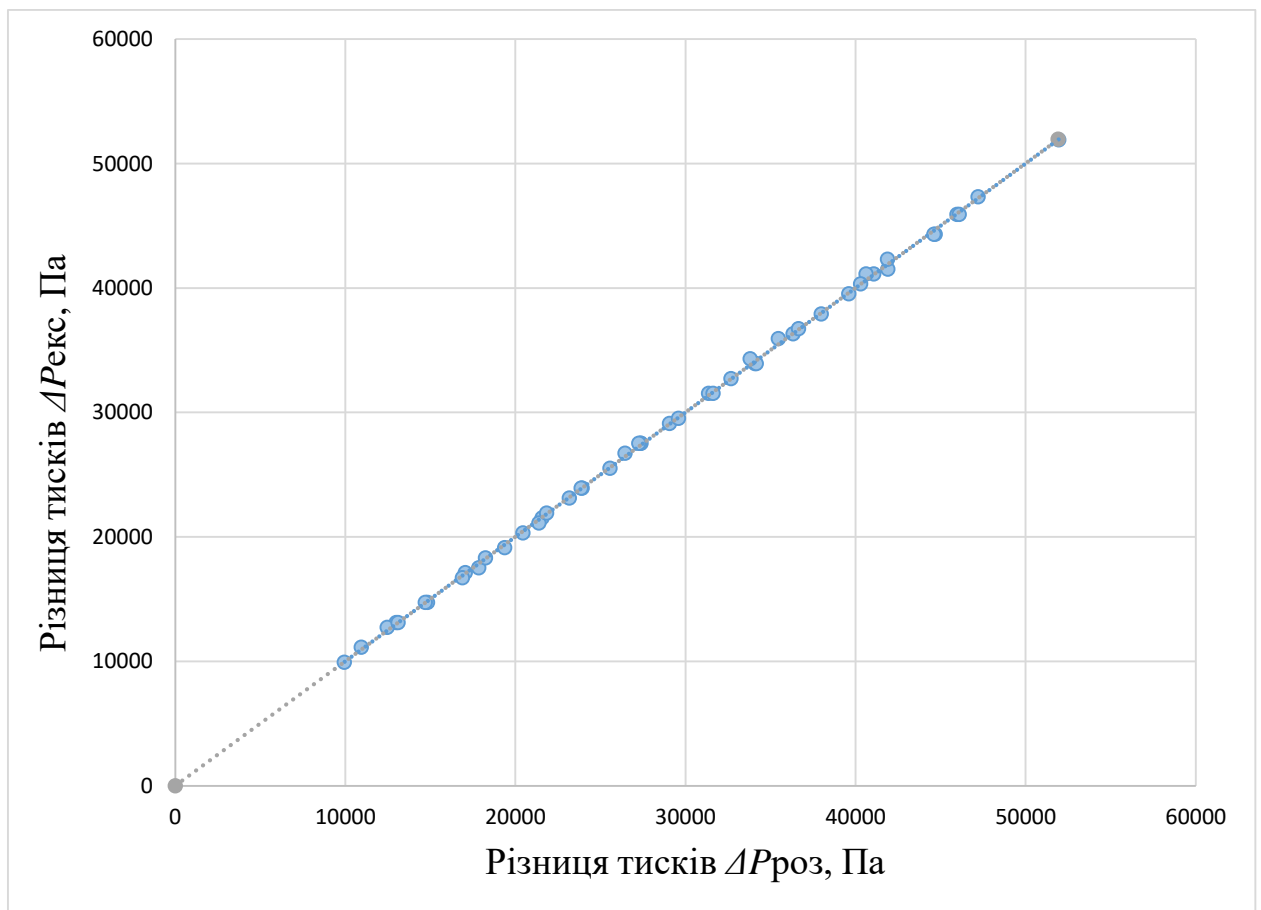


Рисунок 3.10 – Графічне порівняння значень різниці тисків визначених експериментально і розрахованих за допомогою запропонованої залежності

### 3.6 Висновки до розділу

За результатами експериментальних досліджень з використанням розробленої лабораторної установки:

1. Встановлено експериментальні залежності: об'ємної витрати рідини від частоти обертання приводного валу, перепаду тиску від частоти обертання приводного, потужності приводу від частоти обертання приводного валу для різних степенів перекриття прохідного перерізу потоку; перепаду тиску в апараті за постійної частоти обертання приводного валу при регулюванні об'ємної витрати; потужності приводу від частоти обертання приводного валу при регулюванні об'ємної витрати; гідравлічного ККД від об'ємної витрати; та проведене графічне порівняння значень різниці тисків визначених експериментально і розрахованих за допомогою запропонованої залежності.

2. Запропоновано аналітичні вирази, що описують встановлені залежності та підтверджено їх статистичну достовірність при проведенні розрахунків параметрів у межах, визначених програмою досліджень.

3. Встановлено, що для одноступінчастих РПА  $Q_v \sim n$ ,  $\Delta P \sim n^2$ ,  $N \sim n^{2,91}$ , що наближає такі апарати за гідравлічними та енергетичними характеристиками до відцентрових насосів та підтверджує можливість та виправданість застосування для опису гідродинаміки РПА теорії лопатевих машин.

4. Доведено можливість визначення напору, що створюють робочі органи РПА, як функцію одного з параметрів (об'ємної витрати або частоти обертання ротора) і використання у якості контрольного виразу залежності  $Q_v = f(n)$  за формулою (3.1).

5. Співставленням значень різниці тисків визначених експериментально і розрахованих за допомогою залежності (2.17) підтверджено адекватність математичної моделі дослідним даним.

6. Запропоновано рекомендації щодо охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

## **4. ОБҐРУНТУВАННЯ ПРАКТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ**

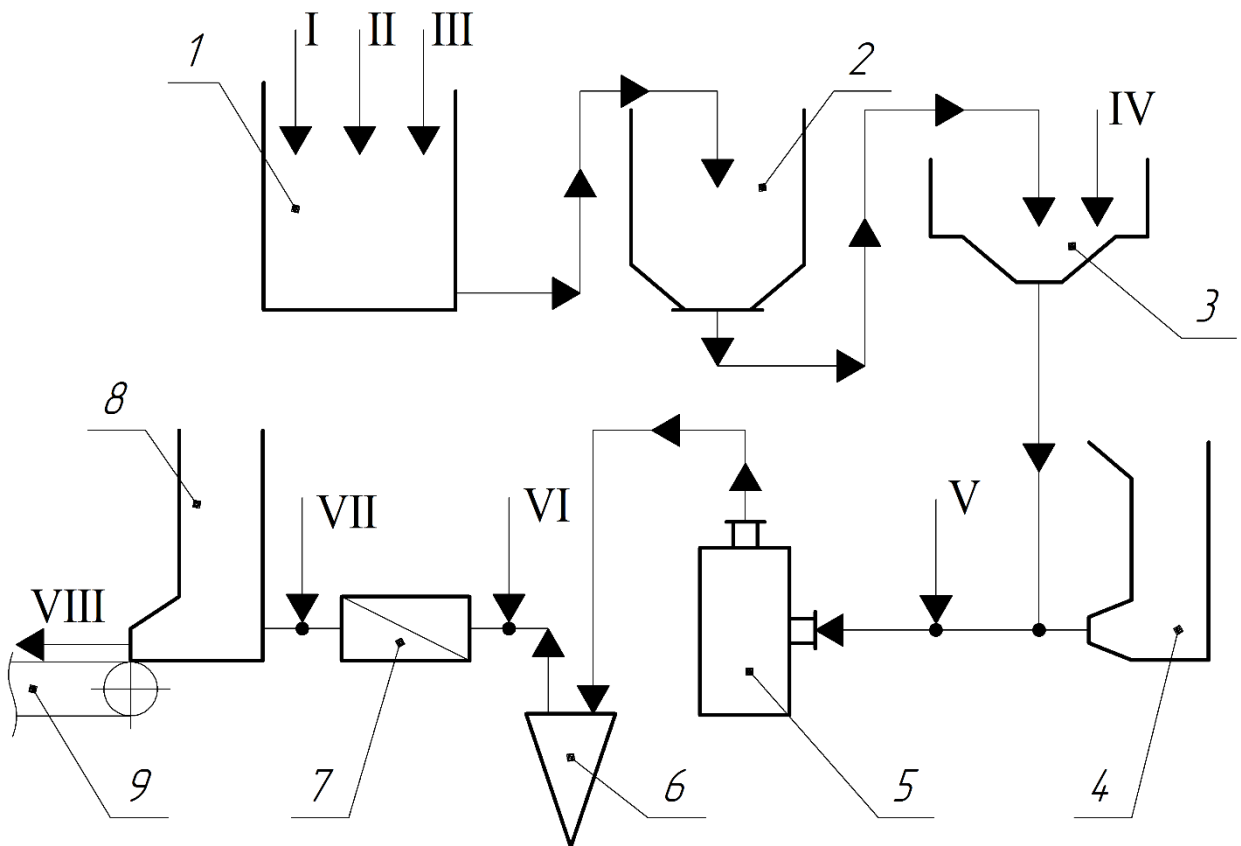
### **4.1 Опис технологічної схеми отримання паперової маси**

Роторно-пульсаційні апарати набули широкого впровадження в технологічні схеми новітніх виробництв, оскільки використання такого виду обладнання зменшує питомі витрати енергії та покращує якість готового продукту. Результати магістерської дисертації дають можливість вдосконалити технологічний цикл підготовки паперової маси до напуску на папероробну машину запропонований Всеросійським НДІ паперу [26] шляхом заміни відцентрового насоса, встановленого після введення у потік паперової маси проклеючих та наповнюючих речовин, на роторно-пульсаційний апарат.

Очікуваний результат від запропонованого вдосконалення (рисунок 4.1) полягає у забезпеченні рівномірного розподілення компонентів в масі, покращенні взаємодії волокон з введеними компонентами, що дозволить покращити міцнісні і споживчі властивості одержаної паперової продукції.

Схема працює в такий спосіб. Свіже волокно, паперовий брак та макулатура, барвники, катіонний крохмаль подаються у певній кількості в композитний бак 1, звідки грубо змішані направляються в машинний басейн 2, потім маса дозується через бак постійного рівня 3 в якому додається клей АКД розведений до концентрації сухий речовин 2...5% при умові, що температура паперової маси менша ніж 35<sup>0</sup>С, це полегшує процес змішування клей з паперовою масою, але якщо температура паперової маси в баку постійного рівня більша ніж 35<sup>0</sup>С то клей АКД вводять в масу безпосередній близькості до напірного ящика 8, наприклад, після очисників маси. На лінії підведення РПА 5 до маси додається в певній кількості наповнювач та з баку реєстрової води 4 також додається реєстрова вода з рН = 8, що збирається з формуючої частини папероробної машини. Це дозволяє зменшити втрати клею та забруднення навколишнього середовища, а також в наслідок лужного

середовища зменшити корозію обладнання та продовжити строк його служби. Після обробки в РПА паперова маса потрапляє в центриклинер 6. Наступний етап це проходження обробки маси у вузловловлювачі 7 з додаванням утримуючих добавок перед та після проходження процесу, введення таких видів добавок покращує проклейку паперової маси. Після проходження всіх видів обробки паперова маса потрапляє в напірний ящик 8 звідки подається на формуючу сітку папероробної машини, де проходить процес формування паперового полотна для виготовлення паперу [26].



1 – композитний бак; 2 – машинний басейн; 3 – бак постійного рівня; 4 – бак води реєстрової; 5 – РПА; 6 – центриклинер; 7 – вузловловлювач; 8 – напірний ящик; 9 – формуюча сітка.

I – свіже волокно; II – макулатура та паперовий брак; III – барвники та катіонний крохмаль; IV – клей з алкілкетен димерів (АКД); V – наповнювач; VI, VII – утримуюча добавка 1 та 2; VIII – паперова маса.

Рисунок 4.1 – Технологічна схема приготування паперової маси з використанням РПА



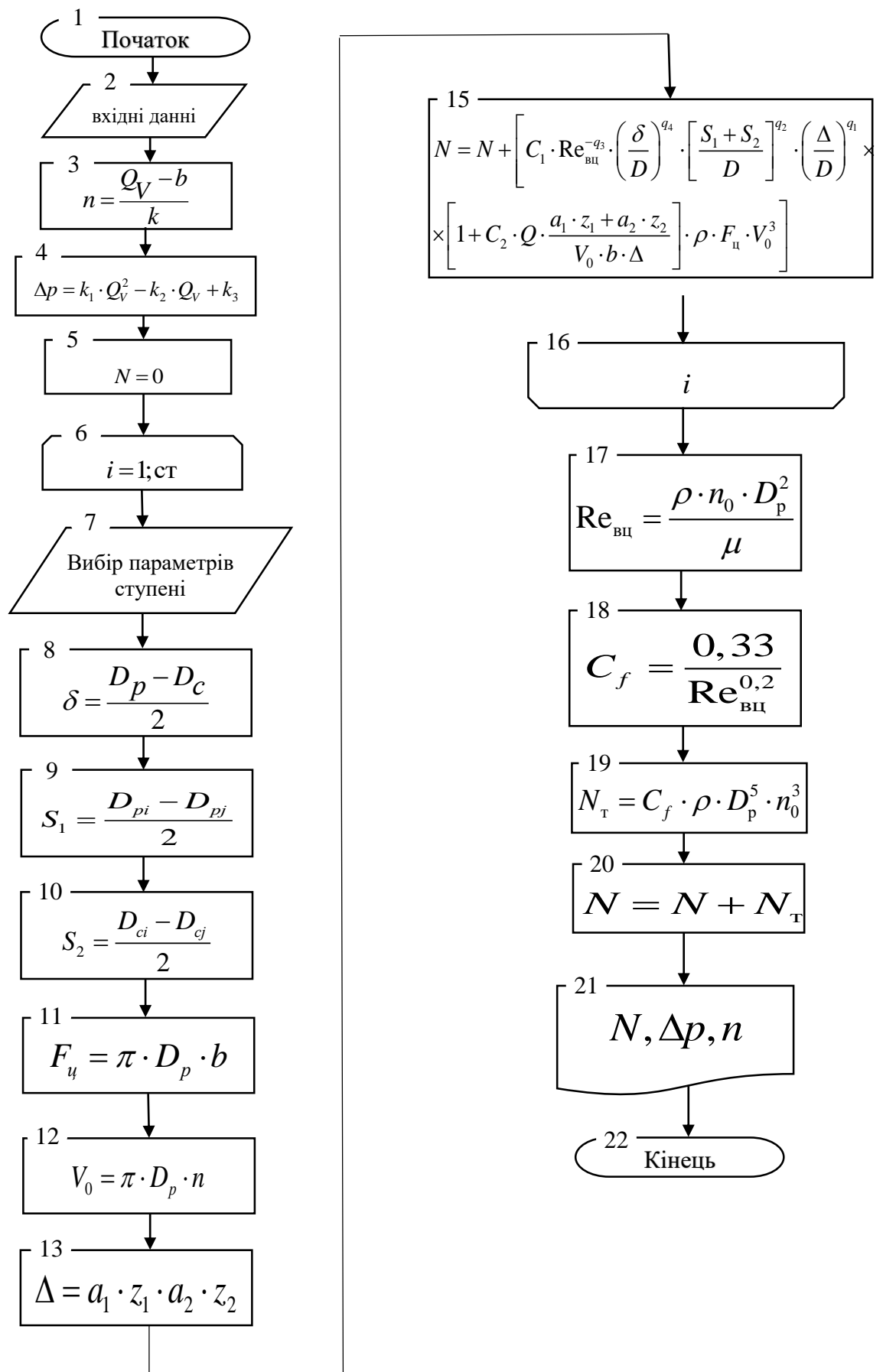
## 4.2 Методика розрахунку роторно-пульсаційного апарату

Мета розрахунку: визначення параметрів пульсаційного вузла та потужності, що необхідна для обробки середовищ в роторно-пульсаційному апараті (РПА).

Методика розрахунку передбачає наступну послідовність дій:

1. Введення вхідних даних таких як:  $C_1, C_2, q_1, q_2, q_3, q_4, \rho, \mu, Q_v$ .
2. Згідно блоку №3 розраховується частота обертання ротора.
3. Згідно блоку №4 розраховується перепад тиску в апараті.
4. В блоці №5 встановлюється початкове значення розрахункової потужності.
5. Розрахунок потужності ступені проводиться у циклі, умовою входу якого є встановлення лічильника циклу значення 1, а умовою виходу – досягнення значення заданого константою (ст). Потужність у циклі розраховується як сума потужностей ступіней де ступінню вважається всі пари “статор – ротор” включаючи (за наявності) пару “крилатка – статор” та пару “ротор – корпус”.
6. Згідно до блоку №7 проводиться вибір параметрів ступіней таких як:  $D_p, D_c, a_1, z_1, a_2, z_2, D_n, b$ .
7. Для подальшого розрахунку потужності ступені необхідно ввести параметри, що враховують особливості конструкції відповідної пари “статор – ротор”. Відповідно до яких розраховується згідно блоків №8-14 наступні значення  $\delta, S_1, S_2, V_0, F_{\Pi}, \Delta, Re_{\text{вц}}$ .
8. Після розрахунку всіх ступіней цикл закривається зі збереженням значень сумарної потужності всіх ступіней згідно блоку №15.
9. Згідно блоків №17-19 розраховуються всі значення для торцевого зазору.
10. Згідно блоку №20 розраховується сумарна потужність апарату.
11. Згідно блоку №21 виводимо значення головних параметрів розрахунку таких як:  $N, \Delta p, n$ .
12. Після проведення послідовно всіх операцій розрахунок завершений згідно блоку №22.

# Блок схема розрахунку РПА



### 4.3 Рекомендації щодо впровадження

Корисна модель належить до апаратів, призначених для проведення неперервних процесів змішування, екстракції, диспергування, емульгування, гомогенізації, хімічної взаємодії реагентів тощо, які протікають в системах «рідина-рідина» або «рідина-тверде тіло», і може бути використаний у харчовій, хімічній, фармацевтичній, лакофарбовій та інших галузях промисловості [27].

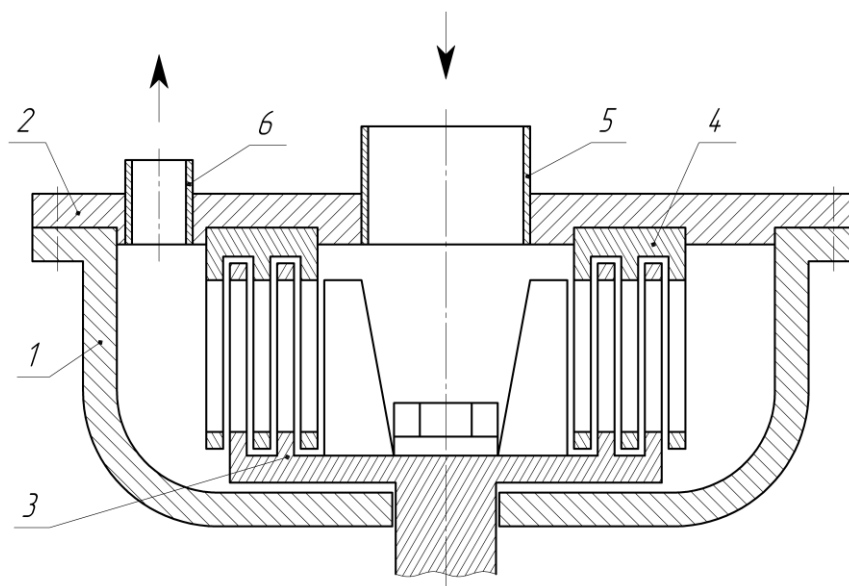
В основу заявленої корисної моделі поставлено задачу вдосконалення конструкції роторно-пульсаційного апарата для спрощення монтажних робіт та обслуговування апарата [27].

Поставлена задача вирішується тим, що у роторно-пульсаційному апараті, що складається з корпусу, кришки, статора, ротора, завантажувального і розвантажувального патрубків, згідно з пропонованою корисною моделлю новим є те, що завантажувальний і розвантажувальний патрубки розміщені на одній частині апарата [27].

Сутність корисної моделі пояснюється зображенням на рисунку 1. фронтальної проекції варіанту роторно-пульсаційного апарату з розміщенням завантажувального і розвантажувального патрубків на кришці [27].

Роторно-пульсаційний апарат працює в такий спосіб. Рідина подається всередину апарату через завантажувальний патрубок і потрапляє в зону дії робочих органів (ротора і статора), під впливом яких рідина обробляється. Після обробки рідина витікає у порожнину між робочими органами і корпусом, звідки відводиться через розвантажувальний патрубок [27].

Запропонована корисна модель нескладна у виготовленні і дозволяє полегшити монтаж та підвищити зручність експлуатації роторно-пульсаційного апарата [27].



1 – корпус; 2 – кришка; 3 – ротор; 4 – статор;  
5 – завантажувальний патрубкок; 6 – розвантажувальний патрубками.

Рисунку – 4.2 Роторно-пульсаційний апарат

#### 4.4 Висновки до розділу

6. Запропоновано варіант промислового використання РПА у технологічному циклі підготовки паперової маси до напуску на папероробну машину.

7. Складено алгоритм розрахунку роторно-пульсаційного апарата з використанням одержаних залежностей.

8. Запропоновано вдосконалену конструкцію РПА, що відрізняється компонуванням елементів вводу і виводу рідини з апарату. Конструкція дозволяє спростити монтаж та поліпшити експлуатацію апарату.

## 5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ

### 5.1 Опис ідеї проекту

В основу розробки стартап проекту покладено ідею комерціалізації модернізованого промислового апарата для інтенсифікації гідромеханічних і масообмінних процесів, що проводяться у рідинах і підвищення якості обробки рідин. Переваги Роторно-пульсаційного апарату по відношенню до інших конструкцій апаратів аналогічного призначення зумовлені багатофакторним впливом на оброблювану рідину, досягнення якого можливе різними способами, що зумовлює велику варіативність конфігурацій робочих органів та параметрів проведення процесів обробки рідин.

Роторно-пульсаційний апарат (РПА) це високоефективний компактний та універсальний апарати, що виконує одночасно функції диспергатора, гомогенізатора, насоса і призначений для приготування гомогенізованих суспензій та емульсій (у тому числі із високим вмістом дисперсної складової), та інших складних рідинних систем із компонентів, що важко змішуються, а також інтенсифікації теплообмінних процесів.

РПА використовується в багатьох галузях промисловості в Целюлозно-паперовій для вирівнювання помелу волокон у паперовій масі, та диспергування волокнистих суспензій, в Харчовій, Косметичній, Будівельній, Нафтопереробній, Хімічній промисловостях для отримання високоякісних суспензій та емульсій з рівномірним дисперсним складом та інтенсифікації масообмінних процесів.

Перевагою застосування даної установки є можливість отримання високоякісних продуктів зі зменшенням затрат на їх виробництво та можливість індивідуального налаштування апарату під конкретний вид виробництва.

Порівняння техніко-економічних характеристик роторно-пульсаційного апарату з конструкціями аналогів дасть змогу визначити слабкі, сильні та нейтральні сторони розробленого проекту (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1 – Визначення слабких, сильних та нейтральних сторін ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2			
1.	Продуктивність по суспензії, м³/год	0,2	0,12	0,15			+
2.	Частота пульсацій в апараті, шт	1600	1450	1500			+
3.	Габаритні розміри апарату, м	0,55×0,25×0,45	0,65×0,43×0,47	0,98×0,39×0,56			+
4.	Напір, м	5	5	5		+	
5.	Стійкість емульсії, %	100	98	97			+
6.	Можливість отримувати суспензій та емульсій з рівномірним дисперсним складом	так	ні	ні			+
7.	Можливість швидкого переоснащення апарату під інший вид виробництва	так	ні	ні			+
8.	Вартість установки, грн	100 000	120 000	150 000			+

На основі аналізу техніко-економічних характеристик, можна зробити висновок про доцільність реалізації даного проекту.

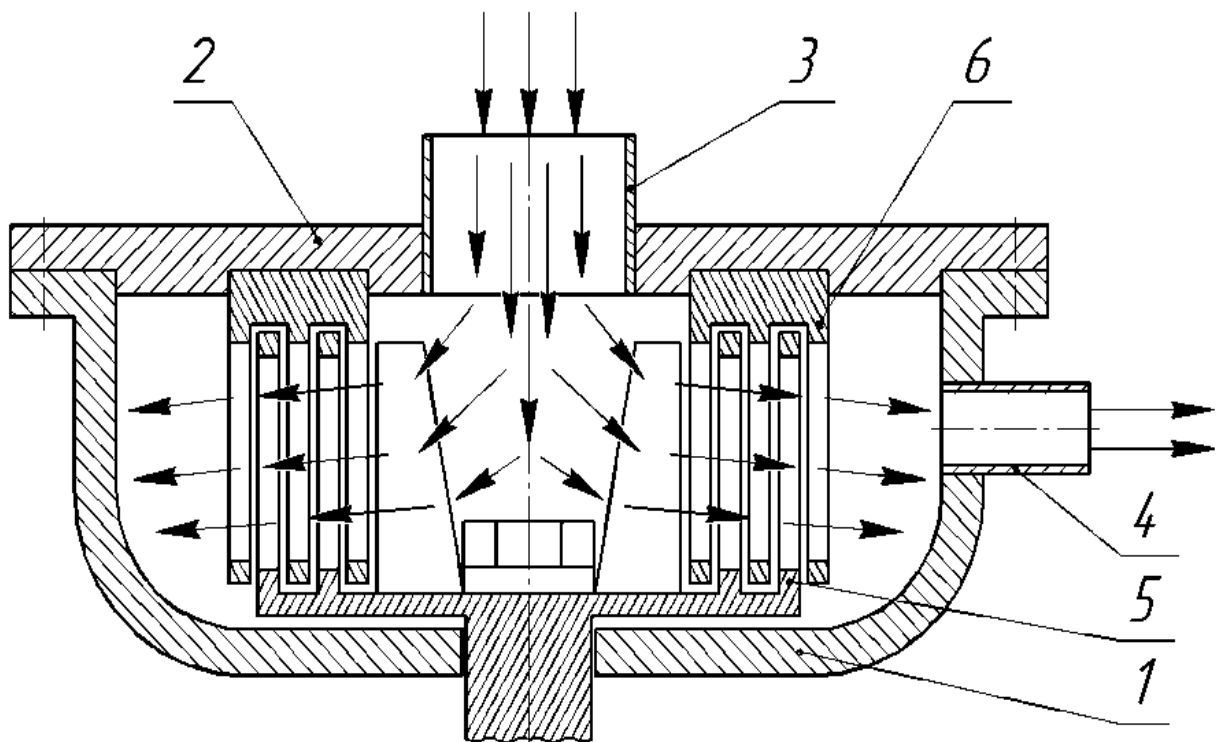
## 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проведено аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Використання РПА дозволяє досягти суттєвого скорочення часу виробництва рідинних систем (наприклад, при виготовленні клеїв досягається скорочення циклу приготування до 30 разів); в харчовій та молочній

промисловості використання РПА при гомогенізації дозволяє досягати рівномірного розподілу жиру, збільшити однорідність продукту, також продукт набуває стійкості до відстоювання вершків і розвитку процесів окислення, збільшується термін зберігання; у спиртовій промисловості підвищує спиртову концентрацію в готовій продукції; у косметичній покращується якість продукту і скорочення циклу виготовлення продукції, підвищення якості; при виготовленні нафтопродуктів значно зменшує енергозатрати на виробництво і прискорює час процесу виготовлення [27].

Принципова схема апарату представлена на рисунку 5.1.



1 – корпус, 2 – кришка, 3 – завантажувальний патрубок,  
4 – вивантажувальний патрубок, 5 – ротор, 6 – статор.

Рисунок 5.1 – Схема роторно-пульсаційного апарату

Процеси в роторно-пульсаційному апарат протікають в такий спосіб. Рідина подається всередину апарату через завантажувальний патрубок 3, що розташований на кришці 2 і потрапляє в зону дії робочих органів ротора 5 і статора 6, під впливом яких рідина обробляється. Робочі органи циліндричної форми з прорізами в бічних поверхнях, також для підвищення напору на роторі

встановлено крилатку. Після обробки рідина витікає у порожнину між робочими органами і корпусом 1, звідки відводиться через розвантажувальний патрубок 4 [27]..

Даний апарат використовується в багатьох технологічних лініях виробництв різних галузей промисловості, але конструкцій апаратів з такими показниками ефективності та витратами енергії на виробництво високоякісної продукції відсутні.

Тому, можна з впевненістю сказати про можливість реалізації проекту з впровадженням в лінію виробництва емульсій та суспензій.

### 5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Для цього спочатку проводився аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/ п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, млрд грн	9,8
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнує
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Цінові, фінансові, особистісні
5	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	18



Середня норма рентабельності в галузі 18% вища ніж середній банківський відсоток на вкладення 15%. За попереднім оцінюванням можна сказати, що ринок є привабливим для входження.

Визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформовано орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (таблиця 5.3).

Таблиця 5.3 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Підвищення продуктивності лінії виробництва суспензій, емульсій та інших рідких продуктів;</li> <li>- можливість переналаштування апарату на різні види продукту;</li> <li>- зменшення потенційних витрат на виготовлення продукту.</li> </ul>	Підприємства, що займаються отриманням емульсій, суспензій та інших рідких продуктів.	Потенційна група клієнтів одна, тому відмінності відсутні.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Якість;</li> <li>- економічна ефективність;</li> <li>- екологічна ефективність;</li> <li>- ціна.</li> </ul>

Після визначення потенційних груп клієнтів проводився аналіз ринкового середовища: складено таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (таблиця 5.4 та таблиця 5.5). Фактори в таблиці подано в порядку зменшення значущості.

Таблиця 5.4 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Конкуренція	зміна числа конкурентів та переваги лідерів виробництва апаратів	Зниження ціни, збільшення асортименту та покращення конструкцій
2	Економічний	Тарифи на транспорт і енергоресурси	Підвищення ціни
3	Виробничо-технологічний	Інноваційні технологічні розробки	Спрямованість на модернізацію
4	Економічний	Темпи інфляції	Підвищення ціни, падіння попиту
5	Економічний	Стабільність курсу гривні	Зміна вартості в залежності від зміни курсу
6	Виробничо-технологічний	Рівень технології конкурентів	Направлення зусиль на модернізацію
7	Економічний	Податкові ставки	Підвищення ціни, падіння попиту
8	Ринковий	Інтенсивність конкуренції	Збільшення та поновлення асортименту

Таблиця 5.5 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Політичний	Інвестиційна політика	Залучення інвестицій
2	Політичний	Політична стабільність	Підвищення ціни
3	Ринковий	Укладення прямих договорів	Розширення ринку збуту
4	Виробничо-технологічний	Оптимізація виробництва	Зменшення собівартості
5	Ринковий	Зміна попиту та пропозиції	Підвищення продуктивності
6	Конкуренція	Агресивність конкуренції	Покращення якості та збільшення асортименту

Отже, було сформовано можливу реакцію компанії на появу нових загроз та можливостей.

Після чого проводився аналіз пропозиції: визначалися загальні риси конкуренції на ринку (таблиця 5.6).

Таблиця 5.6 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції	Олігополія	Пропозиція унікального продукту на ринку, який дозволить знизити бар'єр входу на ринок.
2. За рівнем конкурентної боротьби	Національний	Пропозиція продукту з врахуванням вимог до наслідків його реалізації місцевих громад.
3. За галузевою ознакою	Міжгалузева	Диференційований підхід взаємодії з підприємствами, що відносяться до різних галузей економіки з урахуванням ринку в якому вони працюють
4. Конкуренція за видами товарів	Товарно-родова	Постійний моніторинг ринку, щодо появи технології замінників.
5. За характером конкурентних переваг	Цінова	Здійснення чи проведення зваженої чи гнучкої цінової політики з врахуванням особливостей ринку бізнес-партнера та обсягів пропонованої взаємодії.
6. За інтенсивністю	Немарочна	Створення високого рівня ділової репутації, що сприятиме пізнавальності стартап-проекту.

Отримали експертні оцінки зміни в прогнозованому збільшенні стратегічної зони господарювання (СЗГ) (G) методом Дельфі (таблиця 5.7).

Таблиця 5.7 – Аналіз зміни в прогнозованому збільшенні СЗГ (G)

Параметри	Шкала інтенсивності										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
1. Темп збільшення галузі					●						
2. Приріст числа споживачів							●				
3. Динаміка розширення ринку					●						
4. Ступінь оновлення продукції							●				
5. Ступінь оновлення технології							●				
6. Рівень насичення попиту								●			
7. Суспільне сприйняття товару								●			
8. Державне регулювання збільшення					●						
9. Збільшення числа конкурентів										●	
10. Ступінь застарівання продукції								●			
Загальна оцінка змін	+9										

Отримали значення експертної оцінки прогнозованих тенденцій зміни рентабельності СЗГ (Р) (таблиця 5.8).

Таблиця 5.8 – Аналіз оцінки змін рентабельності СЗГ (Р)

Параметри	Шкала інтенсивності										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5
1. Коливання рентабельності								●			
2. Коливання цін								●			
3. Коливання об'ємів продажів							●				
4. Рівень попиту до потужностей						●					
5. Концепція ринку							●				
6. Стабільність структури ринку							●				
7. Оновлення складу продукції								●			
8. Вплив конкурентів									●		
9. Рівень задоволення замовником							●				
10. Державне регулювання діяльності організації						●					
Загальна оцінка змін рентабельності на перспективу	+13										

Загальна оцінка змін має позитивну спрямованість, що свідчить про гарні перспективи діяльності підприємства у згаданій СЗГ.

Визначили рівень впливу загроз і використання можливостей зовнішнього середовища для підприємства в даній СЗГ (таблиця 5.9). Оцінювання кожного чинника відбувається за шкалою від -5 до +5 балів. Зважена оцінка визначалася як результат множення оцінки чинника, значущості групи факторів та значущості чинника в групі, до якої даний чинник належить.

Таблиця 5.9 – Оцінка зовнішніх погроз і можливостей для підприємства

Група чинників	Чинники	Значущість групи чинників	Значущість чинника в групі	Оцінка чинника	Зважена оцінка	
					Загрози	Можливості
1	2	3	4	5	6	7
1. Економічні	Темпи інфляції	0,3	0,35	-2	-0,21	
	Стабільність курсу гривни		0,25	-2	-0,15	
	Тарифи на транспорт і енергоресурси		0,25	-1	-0,075	
	Податкові ставки		0,15	-1	-0,045	
2. Політичні	Інвестиційна політика	0,25	0,6	4		0,6
	Політична стабільність		0,4	5		0,4
3. Ринкові	Інтенсивність конкуренції	0,2	0,55	-1	-0,11	
	Укладення прямих договорів		0,45	3		0,27
4. Чинники конкуренції	Тенденції зміни числа конкурентів	0,15	0,65	-2	-0,195	
	Переваги лідерів галузі		0,35	-1	-0,052	
5. Виробничо-технологічні	Інноваційні технологічні розробки	0,1	0,4	-1	-0,04	
	Рівень технології конкурентів		0,35	-2	-0,07	
	Оптимізація виробництва		0,25	4		0,1
Підсумкова оцінка		1	-	-	-0,902	1,37

На підставі отриманих результатів розраховано значення привабливості СЗГ за формулою:

$$\text{Привабливість СЗГ} = \alpha \cdot G + \beta \cdot P + \gamma \cdot (O - T),$$

де  $\alpha = 0,2$ ,  $\beta = 0,4$ ,  $\gamma = 0,4$ ;  $G$  - зміни в прогнозованому збільшенні СЗГ;  $P$  - зміни в рентабельності СЗГ.

$$\text{Привабливість СЗГ} = 0,2 \cdot 9 + 0,4 \cdot 13 + 0,4 \cdot (1,37 - 0,902) = 7,18.$$

Значення привабливості СЗГ (7,18) знаходиться в інтервал від 6 до 15, що вважається майже привабливим для підприємства.

Після аналізу конкуренції проводився більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі за моделлю “5 сил” М. Портера (таблиця 5.10).

Таблиця 5.10 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

Детермінанта	Оцінка	Детермінанта	Оцінка
<b>ПОСТАЧАЛЬНИКИ</b>	<b>3,25</b>	<b>ПОКУПЦІ</b>	<b>3,18</b>
Диференціація ресурсів	4	Концентрація покупців у порівнянні з концентрацією підприємств	3
Наявність ресурсів-субститутів	3	Обсяг закупівель покупцями (у підприємства)	4
Витрати зміни постачальників у підприємств у галузі	2	Витрати перемикання покупців у порівнянні з витратами перемикання постачальника	3
Рівень концентрації постачальників	3	Інформованість покупця	2
Значення замовлень для постачальників	4	Здатність до інтеграції вниз за технологічним ланцюжком	4
Вартість закупівлі у співвідношенні із сукупними витратами	2	Товари - замінники	4
Загроза прямої та зворотної інтеграції підприємств у галузі	3	Співвідношення «ціна / загальний обсяг закупівель»	3

Продовження таблиці 5.10

Вплив ціни ресурсу на вартість товару або його диференціювання	5	Відмінності товарів / впізнаність торговельної марки	5
<b>ТОВАРИ-СУБСТИТУТИ</b>	<b>1,75</b>	Вплив на якість / зовнішній вигляд товару	1
Відносна ціна субститутів	2	Вигоди покупця	5
Витрати перемикання	3	Стимули осіб, що ухвалюють рішення	1
Схильність покупців до субститутів	1	<b>ІНДЕКС 2,926</b>	
Можливість задовольняти потреби й бажання клієнтів іншим способом	1		
<b>БАР'ЄРИ ВХОДУ</b>	<b>4,09</b>	<b>КОНКУРЕНТИ</b>	<b>2,36</b>
Економія, пов'язана з масштабом виробництва	5	Зростання галузі	2
Запатентовані відмінності товару	5	Постійні (або складські) витрати / додана вартість	3
Впізнаність торговельної марки	4	Тимчасові надлишки виробничих потужностей (періоди надвиробництва)	2
Витрати перемикання	3	Відмінності в продукції	2
Вимоги до обсягу капіталу	5	Впізнаність торговельної марки	3
Доступ до каналів розподілу	4	Витрати перемикання споживача	4
Абсолютні переваги за витратами (наприклад, власна крива навчання)	4	Концентрація й збалансованість ринкової влади	2
Доступ до необхідних ресурсів	5	Інформаційна складність	2
Власна модель, що відрізняється низькими витратами	2	Різновиди конкурентів	3
Політика уряду	3	Корпоративні частки	1
Патенти й ліцензії	5	Бар'єри на виході	2



Отже висновком є те, що для конкурентоспроможності проекту на ринку він повинен бути малозатратним та інноваційним щоб подолати всі бар'єри на стадії розвитку. З аналізу конкурентної ситуації на ринку, було доведено потенційні можливості існування стартапу.

На основі аналізу конкуренції (таблиця 5.10), а також із урахуванням вимог споживачів до товару (таблиця 5.3) та факторів маркетингового середовища (таблиця 4 та таблиця 5) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності (таблиця 5.11).

Таблиця 5.11 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Продуктивність	Підвищення продуктивності при зменшенні затрат на виробництво
2	Енергоефективність	Збільшили енергоефективність на 15%
3	Якість вихідного продукту	Дозволяє отримувати високоякісний продукт з рівномірним дисперсним складом
4	Універсальність	Можливість швидко переналагодити апарат на обробку іншого виду продукту

Оцінка здатності створити та реалізувати конкурентні переваги стартап проекту, вимагає проведення дослідження його потенціалу з оцінкою його слабких та сильних сторін (таблиця 5.12).

Аналіз стратегічних позицій (факторів) дозволяє скласти комплексне уявлення про внутрішнє середовище підприємства і про його слабкі і сильні сторони.

Таблиця 5.12 – SNW - аналіз внутрішнього середовища підприємства

Сфера	Стратегічна позиція (фактори)	Значущість (вага) j-ої групи факторів у впливі на діяльність підприємства ( $a_j$ )	Питома вага ( $a_i$ ) i-го фактору в відповідному блоці з n-факторів	Експертна оцінка впливу фактору (від негат. (-5) до позит. (+5)) на галузь	Інтегральна оцінка відповідного блоку ( $k_i$ – бали) („+” або „-”,)	Частка фактичного значення інтегрального показника впливу окремого фактору ( $r_i$ ) (групи факторів ( $R_j$ )) у його максимальній оцінці, %
Кадри	- управлінський персонал	0,2	0,1	2	0,04	50,4
	- моральні цінності колективу		0,05	2	0,02	50,2
	- кваліфікація та досвід роботи співробітників		0,05	3	0,03	50,3
	- кадрова політика		0,1	4	0,08	50,8
	- плинність кадрів		0,15	4	0,12	51,2
	- продуктивність праці		0,2	5	0,2	52
	- контроль прийому робочої сили		0,15	5	0,15	51,5
	- виплати працівникам порівняно з конкурентами та середніми по галузі		0,15	4	0,12	51,2
	- застосування додаткових механізмів мотивації праці		0,05	2	0,02	50,2
Разом			1	-	0,78	57,8

Продовження таблиці 5.12

Фінанси	- робота з економічного планування	0,2	0,1	4	0,08	50,8
	- застосування заходів щодо ефективного використання матеріальних, трудових і фінансових ресурсів		0,2	2	0,08	50,8
	- прибуткова основна діяльність		0,06	3	0,036	50,36
	- якість системи обліку показників прибутку, рентабельності, витрат		0,06	4	0,048	50,48
	- облік та аналіз використання оборотних активів та основних фондів		0,1	4	0,08	51,8
	- інвестиційна привабливість підприємства		0,06	2	0,024	50,24
	- податкова дисципліна		0,04	3	0,024	50,24

Продовження таблиці 5.12

Фінанси	- контроль за виконанням планів по реалізації продукції, прибутку; контроль за правильністю встановлення цін на товари	0,2	0,04	3	0,024	50,24
	- роль власників у формування фінансової системи підприємства		0,02	4	0,016	50,16
	- фінансовий стан		0,07	3	0,042	50,42
	- можливості залучення короткострокового капіталу		0,06	3	0,036	50,36
	- можливості залучення довгострокового капіталу		0,1	2	0,04	50,4
	- достатність робочого капіталу		0,05	2	0,02	50,2
	- контроль за здійсненням витрат, пошук можливостей щодо їхнього зниження		0,04	4	0,032	50,32
<b>Разом</b>			1	-	0,582	55,82

Продовження таблиці 5.12

Клієнти	- збір необхідної інформації про ринок	0,2	0,2	3	0,18	51,8
	- номенклатура товарів та можливість розширення асортименту		0,1	3	0,09	50,9
	- частка ринку		0,15	2	0,09	50,9
	- зважена цінова політика		0,1	4	0,12	51,2
	- врахування потреб споживачів		0,15	3	0,135	51,35
	- якість методів та каналів збуту		0,05	3	0,045	50,45
	- рівень організації збуту продукції		0,1	4	0,12	51,2
	- результативність рекламної політики		0,05	2	0,03	50,3
	- проведення акцій, презентацій нових товарів, розпродажів		0,05	1	0,015	50,15
	- імідж, репутація і якість реалізованої продукції		0,05	3	0,045	50,45
Разом			1	-	0,87	58,7

Продовження таблиці 5.12

Бізнес-процеси	- відповідність організаційної структури стратегічній орієнтації підприємства	0,3	0,05	4	0,06	50,6
	- стиль управління		0,01	4	0,012	50,12
	- престиж й імідж підприємства		0,01	3	0,009	50,09
	- організаційний клімат і культура підприємства		0,03	3	0,027	50,27
	- організація системи комунікацій		0,04	2	0,024	50,24
	- загальна система контролю за ефективністю господарювання		0,06	3	0,054	50,54
	- прийняття рішень із застосуванням прогресивних, інноваційних методів управління		0,05	2	0,03	50,3
	- класифікація, здібності й інтереси вищого керівництва		0,15	4	0,18	51,8

Продовження таблиці 5.12

Бізнес-процеси	- взаємодія структурних підрозділів у досягненні поставлених цілей	0,3	0,15	4	0,18	51,8
	- система стратегічного планування		0,3	3	0,27	52,7
	- стан устаткування й приміщень		0,15	3	0,135	51,35
<b>Разом</b>			1	-	0,981	59,81
Підсумок за всіма факторами:		1	-	-	3,213	82,13

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT - аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (таблиця 5.13) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (таблиця 5.12).

Таблиця 5.13 – SWOT - аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Унікальність</li> <li>2. Стан виробництва</li> <li>3. Динаміка попиту</li> <li>4. Рівень конкуренції</li> </ol>	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Малий досвід роботи на ринку</li> <li>2. Малий асортимент продукту</li> <li>3. Темпи інфляції</li> <li>4. Політична нестабільність</li> </ol>
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Швидке освоєння ринку</li> <li>2. Ненасиченість ринку</li> <li>3. Тенденція росту попиту</li> <li>4. Витіснення малих підприємств</li> </ol>	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Висока схильність до змін регуляторних заходів</li> <li>2. Поява на ринку іноземних конкурентів</li> <li>3. Товари субституту задовольняють потреби ринку за зниженою вартістю</li> <li>4. Зміна пріоритетів в потребах, внаслідок політичної нестабільності</li> </ol>

На основі SWOT – аналізу розроблено альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (дивись таблиця 5.10).

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (таблиця 5.14).



Таблиця 5.14 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Посилення сильних сторін за рахунок використання ринкових можливостей	4,4	0,5
2	Мінімізація ринкових загроз за рахунок сильних сторін стартап-проекту	3,8	1
3	Нейтралізація слабких сторін за рахунок ринкових можливостей	2,7	1
4	Вихід з ринку	0	0,5

Виходячи з аналізу, в якості альтернативи обрано стратегію посилення сильних сторін за рахунок використання ринкових можливостей, так як імовірність отримання ресурсів найбільша, а строк реалізації найменший.

#### 5.4 Розроблення ринкової стратегії ринку

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (таблиця 5.15).

Таблиця 5.15 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Просто та входу у сегмент
Підприємства, що займаються виробництвом емульсій, суспензій та інших рідких продуктів, підприємства які мають у технологічній схемі процес диспергування та гомогенізації	Визначатиметься готовністю підприємств піти на додаткові витрати пов'язані з впровадженням чи імплементації ідеї проекту в господарську діяльність	Залежатиме від рівня, темпів розвитку економіки взагалі і галузей – споживачів зокрема, а також рівня і характеру підтримки іновачійного підприємства зі сторони держави	Низька, а концентрація висока	Високі бар'єри входу на ринок
Які цільові групи обрано: ПАТ «Danone Україна», ПАТ «Альміра», ПАТ «Milkiland Україна», ТОВ МНВО «Біокон», ООО «Бьюти Трейд Продакшн», ПАТ «ДніпроАзот».				

За результатами аналізу профілю групи споживачів, було визначено цільові групи (таблиця 5.15) для яких пропонується стратегія диференційованого маркетингу.

Для роботи в обраних сегментах ринку було сформовано базову стратегію розвитку (таблиця 5.16).

Таблиця 5.16 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
Ринкове позиціонування.	Диференціація структури маркетингу.	Передбачає надання товару з точки зору споживача з універсальними характеристиками, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару.	Стратегія диференціації маркетингу.

Отже, для роботи в обраних сегментах ринку було обрано стратегію диференціації маркетингу, яка дозволяє компанії домогтись більшої рентабельності за рахунок того, що ринок готовий прийняти більш високу ціну (цінову премію бренду).

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (таблиця 5.17).

Таблиця 5.17 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
Ні	Передбачається розвиток ринку	Ні не буде, вдосконалює власну унікальність	Стратегія наслідування лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. таблиця 5.3), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (таблиця 5.16) та стратегії конкурентної поведінки (таблиця 5.17) розроблено стратегію позиціонування (таблиця 5.18), що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельний проект.

Таблиця 5.18 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
Підвищення продуктивності, енергоефективності та якості отриманого продукту.	Стратегія диференціації маркетингу	Продуктивність, енергоефективність, якість вихідного продукту, оптимізація виробництва	Високоякісний продукт, рівномірність дисперсного складу

В результаті виконання даного підрозділу було узгоджено систему рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначає напрям роботи стартап-компанії на ринку.

## 5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 5.19 підсумовано результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.19 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Підвищення продуктивності, енергоефективності та якості отриманого продукту.	Продуктивність, зменшення витрат на виготовлення готової продукції, можливість швидкого переналаштування на інший вид продукту.	Продуктивність, енергоефективність, якість вихідного продукту, універсальність виробництва.

При визначенні оптимальної системи збуту, було прийнято рішення, що збут проводитиметься власними силами чи з залученням фахового посередника.

Основною та останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (таблиця 5.20).

Таблиця 5.20 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Цільові клієнти орієнтовані на використання вузько-спеціалізованих комунікацій, що визначаються галузевими особливостями їх приналежності.	Інтернет, спец виставки, семінари, друкована продукція.	Спеціалізовані виставки	Привернути увагу до унікальності ідеї стартапу	-

## **5.6 Висновки до розділу**

В процесі розробки стартап проекту було розроблено висновки, що можлива ринкова комерціалізація проекту. В ході роботи було визначено сильні, слабкі та нейтральні характеристики розробленого проекту, проведено порівняння техніко-економічних характеристик з аналогічними апаратами, також проведені маркетингові дослідження обраного сегменту ринку та оцінка рівня динаміки конкуренції в базових та споріднених галузях, обґрунтовані фактори конкурентної спроможності стартап проекту. Аналіз всіх цих даних дозволяє стверджувати про перспективи створення та розвитку стартапу. На користь цього свідчить наявність попиту, що виражена потребою.

## ВИСНОВКИ

1. За результатами аналітичного огляду підходів до визначення залежностей, що описують гідродинамічні характеристики РПА, стану розвитку конструкцій роторно-пульсаційних апаратів, а також технологічних рішень на їх основі, сформульовано мету та задачі досліджень.

2. Обґрунтовано фізичну модель процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті з циліндричними набірними циліндрами.

3. Складено та розв'язано математичну модель процесу перетворення енергії у потоках рідини в роторно-пульсаційному апараті, що дозволило одержати аналітичний вигляд функціональної залежності напору, що створює ротор РПА від частоти обертання ротора і об'ємної витрати рідини з урахуванням особливостей конструкції робочих органів апарата.

4. Встановлено експериментальні залежності: об'ємної витрати рідини від частоти обертання приводного валу, перепаду тиску від частоти обертання приводного, потужності приводу від частоти обертання приводного валу для різних степенів перекриття прохідного перерізу потоку; перепаду тиску в апараті за постійної частоти обертання приводного валу при регулюванні об'ємної витрати; потужності приводу від частоти обертання приводного валу при регулюванні об'ємної витрати; гідравлічного ККД від об'ємної витрати; та проведене графічне порівняння значень різниці тисків визначених експериментально і розрахованих за допомогою запропонованої залежності.

5. Запропоновано аналітичні вирази, що описують встановлені залежності та підтверджено їх статистичну достовірність при проведенні розрахунків параметрів у межах, визначених програмою досліджень.

6. Доведено можливість визначення напору, що створюють робочі органи РПА, як функцію одного з параметрів (об'ємної витрати або частоти обертання ротора).

7. Складено алгоритм розрахунку роторно-пульсаційного апарата з використанням одержаних залежностей.

8. Запропоновано вдосконалену конструкцію РПА, що відрізняється компонованням елементів вводу і виводу рідини з апарату. Конструкція дозволяє спростити монтаж та поліпшити експлуатацію апарату.

9. Запропоновано варіант промислового використання РПА у технологічному циклі підготовки паперової маси до напуску на папероробну машину.

10. Розроблено стартап проект за темою магістерської дисертації.

11. За результатами виконання магістерської дисертації опубліковано дві статті у фахових виданнях, зроблено виступи та опубліковано п'ять тез доповідей на міжнародних конференціях, отримано патент України на корисну модель.



**Статті у наукових журналах:**

1. Колобашкін Л.В., Семінський О.О. / **Гідродинамічні характеристики одноступінчастого роторно-пульсаційного апарату з осьовою компенсацією тиску в зазорі між ротором і корпусом.** Міжнародний науково-технічний журнал "Mechanics and Advanced Technologies" #3 (81) 2017 р.

2. Колобашкін Л.В., Семінський О.О. / **Застосування роторно-пульсаційних апаратів в інноваційних технологіях.** Науковий журнал "Молодий вчений" №3 (55) березень 2018 р.

Особистий внесок здобувача: підготовка експерименту, проведення досліджень та участь в аналізі результатів, підготовка до опублікування.

**Патенти на корисні моделі та винаходи:**

1. Патент України на корисну модель № 114656, МПК(2006.01) B01F 7/12, B01F 7/28 пуб. 10.03.2017 Бюл. №5.

**Тези і матеріали наукових конференцій:**

1. Колобашкін Л.В., Семінський О.О. «промислове використання роторно-пульсаційних апаратів»// Збірник тез доповідей IX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання» 24-26 листопада, Київ 2015.

2. Колобашкін Л.В., Лялька Г.О., Семінський О.О. «Визначення витрат енергії на подолання тертя у міжциліндровому зазорі роторно-пульсаційного апарата» // Збірник тез доповідей X міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання» 18-19 квітня, Київ 2016.

3. Колобашкін Л.В., Семінський О.О. «Установка для експериментального дослідження гідродинамічних характеристик роторно-пульсаційного апарату»// Збірник тез доповідей XI міжнародної

науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання» 06-07 грудня, Київ 2016.

4. Колобашкін Л.В., Семінський О.О. «Аналіз компонування роторно-пульсаційних апаратів у технологічних лініях»// Збірник тез доповідей XII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання», Київ 2017.

5. Семінський О.О., Колобашкін Л.В. «Оцінка впливу гідродинамічної кавітації на фізико-хімічні властивості водних середовищ»// Збірник тез доповідей XXII міжнародної науково-технічної конференції «Гідроаеромеханіка в інженерній практиці», 23-26 травня, м. Черкаси - 2017.

## ВЫВОДЫ

1. По результатам аналитического обзора подходов к определению зависимостей, которые описывают гидродинамические характеристики РПА, состояния развития конструкций роторно-пульсационных аппаратов, а также технологических решений на их основе, сформулирована цель и задачи исследований.

2. Обоснована физическая модель процесса превращения энергии в потоках жидкости в роторно-пульсационном аппарате с цилиндрическими наборными цилиндрами.

3. Составлена и развязана математическая модель процесса превращения энергии в потоках жидкости в роторно-пульсационном аппарате, что позволило получить аналитический вид функциональной зависимости напора, который создает ротор РПА от частоты вращения ротора и объемной затраты жидкости с учетом особенностей конструкции рабочих органов аппарата.

4. Установлены экспериментальные зависимости: объемной затраты, напору, что создают рабочие органы, мощности повода и мощности холостого хода, гидравлического КПД от частоты вращения ротора; напорно-расходной характеристики аппарата; гидравлических потерь в корпусе РПА в виде зависимости потерь напора от объемной затраты.

5. Предложены аналитические выражения, которые описывают установленные зависимости и подтверждены они статистическую достоверность при проведении расчетов параметров в пределах, определенных программой исследований;

6. Доказана возможность определения напора, которые создают рабочие органы РПА, как функцию одного из параметров (объемной затраты или частоты вращения ротора).

7. Составлен алгоритм расчета роторно-пульсационного аппарата с использованием полученных зависимостей.

8. Предложена усовершенствованная конструкция РПА, которая отличается компоновкой элементов вводу и вывода жидкости из аппарата.

Конструкция позволяет упростить монтаж и улучшить эксплуатацию аппарата.

9. Предложен вариант промышленного использования РПА в технологическом цикле подготовки бумажной массы к напуску на бумагоделательную машину.

10. Разработан стартап проект по теме диссертационной работы.

11. По результатам работы подготовлены две статьи в профессиональных изданиях, сделаны выступления и опубликовано пять тезисов докладов на международных конференциях, получен патент Украины на полезную модель.

## CONCLUSIONS

1. According to the results of the analytical review of the approaches to the definition of dependencies describing the hydrodynamic characteristics of the RPA, the state of development of structures of rotary-pulsating apparatus, as well as technological solutions based on them, the purpose and tasks of research are formulated.

2. Physical model of the process of energy transform in fluid flows in rotary pulse apparatus with cylindrical clutter cylinders is grounded.

3. A mathematical model of the process of energy transform in fluid flows in rotary pulse apparatus was developed and solved, which allowed to obtain an analytical form of the functional pressure dependence, which creates an RPA rotor from the rotor rotation frequency and volume flow of fluid, taking into account the structural features of the working bodies The device.

4. Experimental dependencies are established: volume flow, pressure, creating working bodies, drive power and idle power, hydraulic efficiency from rotor rotation frequency; Pressure and expense characteristics of the device; Hydraulic losses in the RPA case in the form of dependence of pressure losses on volumetric costs.

5. The analytical expressions describing the established dependencies and their statistical reliability are proved in the course of calculation of parameters within the limits determined by the research program;

6. It is proved the possibility of determining the pressure creating the working bodies of the RPA as a function of one of the parameters (volume flow or rotor speed).

7. An algorithm for calculating the rotor-pulsating apparatus using the obtained dependences is made.

8. An improved design of RPA is proposed, which differs in the layout of the elements of the input and output of the fluid from the apparatus. The design allows for easy installation and improved operation of the machine.

9. The variant of industrial use of RPA in the technological cycle of preparation of paper mass before loading on a paper-making machine is proposed.

10. A startup project on the topic of dissertation work has been developed.

11. As a result of the work, two articles have been prepared in the professional journals, the speeches have been made and five theses have been published at international conferences, and the patent of Ukraine has been obtained for a useful model.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Промислове використання роторно-пульсаційних апаратів. Збірник тез доповідей IX міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання" (Київ 24-26 листопада 2015) зб. тез. доп. К.: Видавництво УВОІ "Допомога "УСІ" 2015р., магістрант Колобашкін Л.В., к.т.н., доцент Семінський О.О.

2. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: Теория и практика / М.А. Промтов. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 247 с.

3. Пат. № 2257257 С1 Російська Федерація, МПК (2007.1) B01F 7/00, B01F 7/28. Многосекционный роторно-пульсационный аппарата. Г.Е. Иванец, С.В. Грунич, Е. А. Светкина, В. В. Артемасов, С. В. Аверкин (RU); патентообладатель – Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (RU). – № 2004107590/15, заявл. 15.03.2004; опубл. 27.07.2005.

4. Пат. № 251559 С2 Російська Федерація, МПК (2006.1) B01F 7/02. Роторно-пульсационный аппарата. В.С. Хромых (RU); патентообладатель – В. С. Хромых, В. П. Лапенков, Общество с ограниченной ответственностью "ПРОМСЕРВИС" (RU). – № 2012131939/05, заявл. 26.07.2012; опубл. 20.05.2014.

5. Пат. № 2516146 С2 Російська Федерація, МПК (2006.1) B01F 7/12. Роторно-пульсационный аппарата. В. В. Татаринов, А. Е. Ломовских, В. П. Иванов, А. А. Томилов, Д. Е. Капустин, И. П. Сысоев (RU); патентообладатель – Федеральное государственное военное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Военный авиационный инженерный университет" (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации (RU). – № 2011124397/05, заявл. 16.08.2011; опубл. 20.05.2014.

6. Пат. № 106849 U1 Російська Федерація, МПК (2006.1) B01F 7/26. Устройство роторно-пульсационного аппарата. С.Г. Карташов, Л. И. Логачёв,

В. С. Ромалийский, А. А. Перов, Л. Н. Петрова, Л. М. Логачёва, Г. П. Карташова, В. Н. Шабаров (RU); патентообладатель – Российская академия сельскохозяйственных наук Государственное научное учреждение Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВИЭСХ Россельхозакадемии) (RU). – № 2011112963/05, заявл. 05.04.2011; опубл. 27.07.2011.

7. Пат. № 101263 С2 Україна, МПК (2006.1) B01F 7/18, B01F 7/28. Роторно-пульсацийний апарат. І. М. Рудкович, О. М. Манойло (UA); заявники і патентовласники – І. М. Рудкович, О. М. Манойло (UA). – № а 2011 13741, заявл. 22.11.2011; опубл. 26.03.2012, Бюл. №6.

8. Пат. № 13748 U Україна, МПК (2006) B01F 7/00. Роторно-пульсацийний апарат. А. В. Фесенко, В. С. Пличко, П. Б. Кузнецов, С. В. Луцкий, Р. Лембіт (UA); патентовласник – товариство з обмеженою відповідальністю "ЕТН" (UA). – № u200509950, заявл. 24.10.2005; опубл. 17.04.2006, Бюл. №4.

9. Промтов М.А Интенсификация химико-технологических процессов в импульсных потоках гетерогенных жидкостей [Текст]: дис. ... докт. тех. наук: 05.17.08: защищена 2001: затв. 15.11.2002 / Промтов Максим Александрович. – Тамбов: 2001. – 517 с. – Библиогр.: с. 413–451.

10. Акулин В.В. Метод расчета скорости и ускорения потока жидкости в каналах роторно-импульсного аппарата/ А.А. Акулин, М.А. Прмтов// Труды ТГТУ.-2005. – Т.87. – Вып.17.-С.9-11.

11. Никитин А.А. Расчет расхода жидкости в Роторно-импульсном аппарате / А.А. Никитин, Е.В. Денисов, В.В. Акулин// Сборник статей студентов, бакалавров и магистрантов. Вы-пуск VI. – Тамбов: ТОГУП «Тамбовполиграфиздат», 2006. С. 69-71. – ISBN 5-94359-032-3.

12. Юдаев, В.Ф. Исследование гидродинамической сирены [Текст] / В.Ф. Юдаев, Д.Т. Кокорев // Известия вузов. Машиностроение. – 1969. – № 10. – С. 72-77.



13. Зимин, А.И. Прикладная механика прерывистых течений [Текст] / А.И. Зимин. – М.: Фолиант, 1997. – 308 с.
14. Орлов С.Е. Математическое моделирование площади проходного сечения прерывателя многоступенчатого роторно-пульсационного аппарата / С.Е. Орлов, М.С. Василишин // Ползуновский весник.-2013.- № 1. С. 168-172.
15. Промтов М.А. Интенсификация химико-технологических процессов в импульсных потоках гетерогенных жидкостей [Текст]: дис. ... докт. тех. наук: 05.17.08: защищена 2001: затв. 15.11.2002 / Промтов Максим Александрович. – Тамбов: 2001. – 517 с. – Библиогр.: с. 413–451.
16. Дмитрієвський Д.І. Технологія лікарських препаратів промислового виробництва: Навчальний посібник / Д.І. Дмитрієвський. Л.І. Богуславська, Л.М. Хохлова та ін.; Ред. Д.І. Дмитрієвський. – Вид. 2-е. - Вінниця: Нова книга, 2008. – 280 с.
17. Балабудкин, М. А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности / М. А. Балабудкин. – М. Медицина, 1983. – 159 с.
18. Орлов С.Е. Аналитическое моделирование процесса измельчения частиц пластинчатых материалов в аппаратах роторно-пульсационного типа /С.Е. Орлов// Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы 5-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с Международным участием. (24-26 мая 2012 г., г. Бийск) / В 2-х ч., ч 1./ Алт. гос. Техн. Ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-т, 2012. - С.70-74.
19. Мидуков, Н.П. Повышение эффективности процесса диспергирования многофазных систем целлюлозно-бумажного производства в роторно-пульсационном аппарате[Текст]: дис. ... канд. тех. наук: 05.21.03: защищена 2009 /Мидуков Николай Петрович. – Санкт-Петербург: 2009. – 139 с. – Библиогр.: с. 122–134. – 04200955553.
20. ДСТУ ГОСТ 6134-2009 (ИСО 9906:1999) Насоси динамічні. Методи випробування. – К.: ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ УКРАЇНИ, 2009. – 94 с.

21. Использование MS Excel для анализа статистических данных: учебное пособие; В.Р. Бараз, В.Ф. Пегашкин; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нежнетагил. техн. Ин-т (филиал). – 2-е издание., перераб. и доп. – Нижний Тагил: НТИ( филиал) УрФУ, 2014. – 181 с.

22. Савчук В.П. Обработка результатов измерений. Физическая лаборатория. Ч1:Учеб. пособие для студентов вузов. — Одесса: ОНПУ, 2002 – 54 с. ил.

23. Гідродинамічні характеристики одноступінчастого роторно-пульсаційного апарату з осьовою компенсацією тиску в зазорі між ротором і корпусом. Міжнародний науково-технічний журнал "Mechanics and Advanced Technologies" #3 (81) 2017 р., магістрант Колобашкін Л.В., к.т.н., доцент Семінський О.О.

24. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

25. Gülich J.F. Centrifugal pumps / J.F. Gülich. – London-New York: Springer Heidelberg Dordrech, 2014. – 1116 с.

26. Технология целлюлозно-бумажного производства. В 3 т. Т. II. Производство бумаги и картона. Ч. 1. Технология производства и обработки бумаги и картона. – СПб.: Политехника, 2005. – 423 с.

27. Патент України на корисну модель № 114656, МПК(2006.01) B01F 7/12, B01F 7/28 пуб. 10.03.2017 Бюл. №5.